

# Faszinierende Teilchenphysik

Philip Bechtle, Florian Bernlochner, Herbi Dreiner, Christoph Hanhart,  
Josef Jochum, Jörg Pretz, Kristin Riebe



06. März 2024

# Ziele und Zielgruppen

- ▶ Ein Buch für ...
  - ▶ die interessierte Öffentlichkeit
  - ▶ ältere Schülerinnen und Schüler mit großem Interesse an Physik
  - ▶ LehrerInnen und Lehrer
  - ▶ WissenschaftsjournalistInnen
  - ▶ andere VermittlerInnen
  - ▶ vielleicht auch jüngere Studierende
- ▶ ... mit dem Anspruch
  - ▶ (fast) ohne Mathematik
  - ▶ (fast) ohne Vorwissen in moderner Physik auszukommen ...
- ▶ ... und trotzdem sehr tiefes Verständnis für **Methoden** und **Inhalte** moderner Teilchenphysik in Theorie und Experiment zu vermitteln.



# Die Entstehung des Buches

- ▶ Bonn Teilchenphysikshow (H. Dreiner et al.) seit 2012



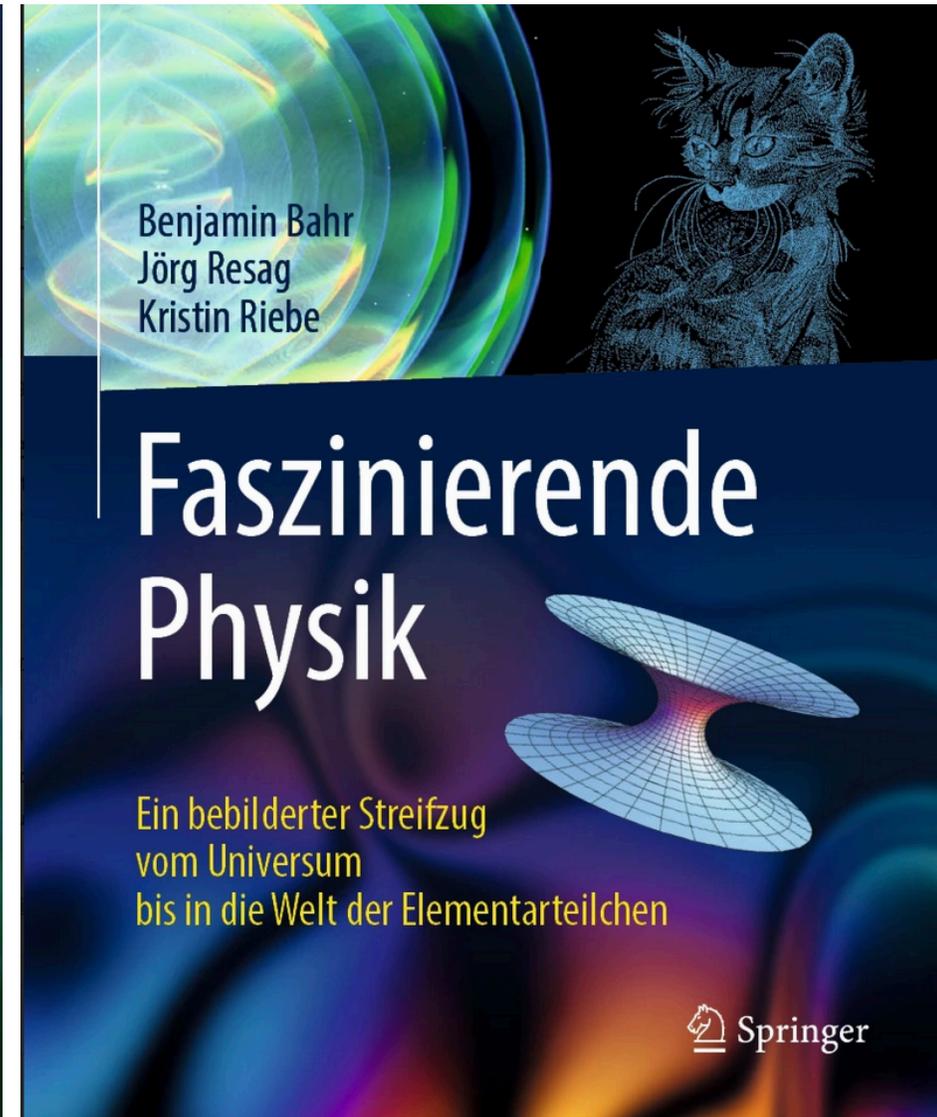
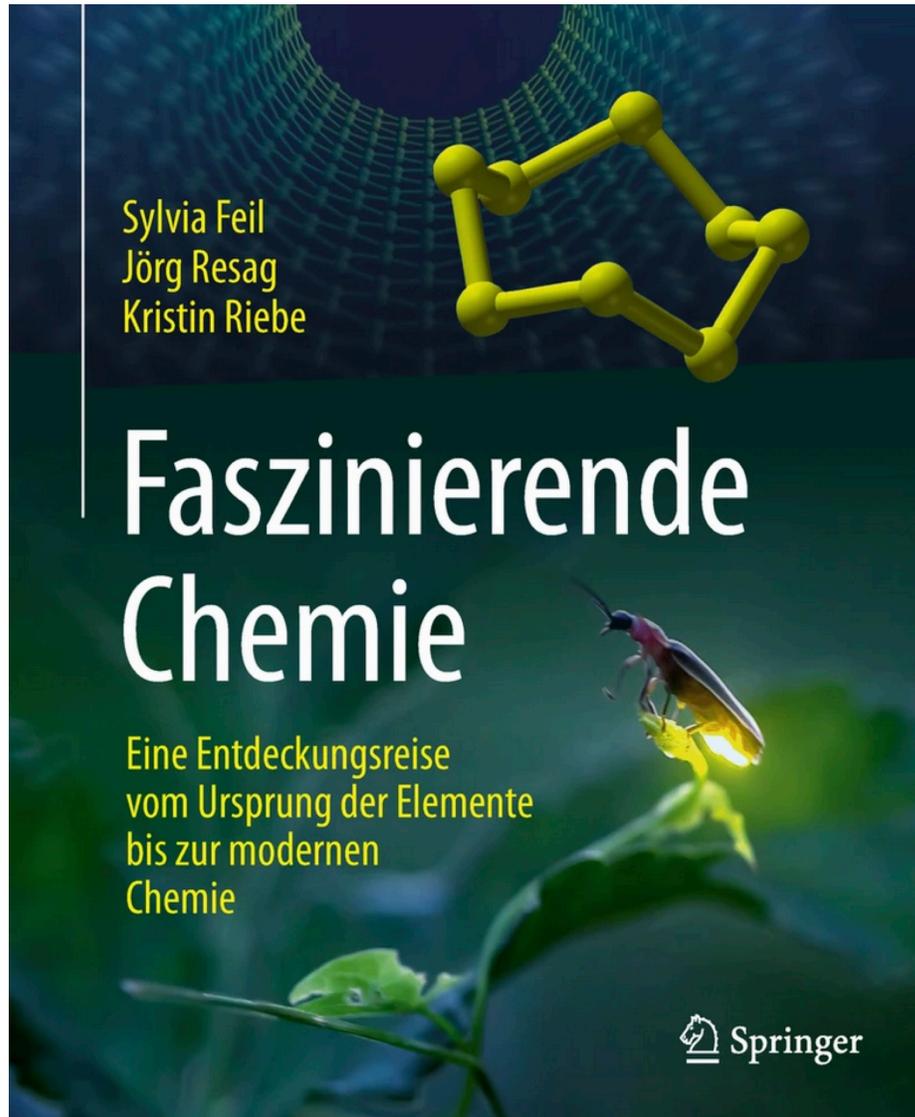
Springer-Editorin Lisa Edelhäuser



- ▶ Fortbildungen im Rahmen des SFB TR 110 (C. Hanhart et al.)



# Die Wegbereiter



# Die Struktur des Buches

- ▶ Die Welt der Teilchen
- ▶ Allgemeine Grundlagen
- ▶ Experimentelle Grundlagen
- ▶ Theoretische Grundlagen
- ▶ Beschleuniger und Detektoren
- ▶ Grundlagen der Auswertung von Teilchenphysikexperimenten
- ▶ Das Standardmodell der Elementarteilchen
- ▶ Die Besonderheiten der starken Wechselwirkung
- ▶ Der Triumph des Standardmodells und darüber hinaus
- ▶ Die Grenzen des Standardmodells
- ▶ Die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells
- ▶ Die Verbindung des Größten mit dem Kleinsten

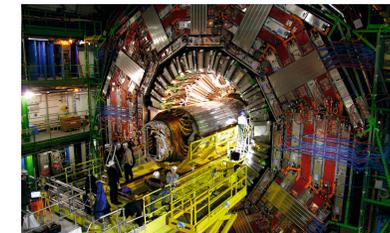
Das Buch ist in folgende Themenbereiche aufgeteilt: Kapitel 1 bietet eine allgemeine Übersicht und beschreibt, wovon dieses Buch handelt. Darauf aufbauend legt Kapitel 2 allgemeine konzeptionelle Grundlagen, die in den Kapiteln 3 und 4 in experimentelle und theoretische Richtung vertieft werden. In den Kapiteln 5 und 6 beschreiben wir, mit welchen konkreten Apparaturen und Methoden das Unsichtbare in der subatomaren Welt sichtbar gemacht werden kann. In Kapitel 7 und 8 stellen wir die Elemente des „Standardmodells“ vor, der besten bekannten Theorie der fundamentalen Bausteine und Wechselwirkungen, um dann in Kapitel 9 zu zeigen, wie gut diese Theorie bereits experimentell bestätigt ist. Allerdings gibt es immer noch offene Fragen. Diesen haben wir Kapitel 10 gewidmet. Die daraus abgeleiteten Suchen nach möglicher Physik jenseits des Standardmodells stellen wir in Kapitel 11 vor. Auch aus Astronomie und Kosmologie lernen wir einiges über die Teilchenphysik. Mit dieser spannenden Forschung und einer Beschreibung der Verbindung des Größten mit dem Kleinsten schließen wir das Buch in Kapitel 12.

Es ist nicht notwendig, dem Aufbau des Buches zu folgen, sondern Sie können sich natürlich auch gemäß Ihren Interessen entlang unterschiedlicher Linien durch das Buch bewegen. Hierbei kann Ihnen das ausführliche Glossar am Ende des Buches Hilfestellung leisten, in dem wiederholt auftauchende Begriffe und Konzepte knapp beschrieben werden. Albert Einstein

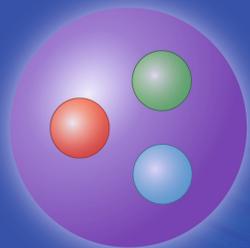
wird der Satz zugeschrieben „Man sollte die Dinge so einfach wie möglich erklären – aber nicht einfacher.“ Weil wir einen recht umfassenden Überblick über die Kern- und Teilchenphysik bieten wollen, konnten wir die komplexeren Themen nicht einfach weglassen. Daher sind notwendigerweise einige Artikel keine leichte Kost, worauf wir manchmal auch explizit hinweisen. Wir möchten Sie ermutigen, trotzdem weiterzulesen. Auch ohne jeden Artikel im Detail verstanden zu haben, sollten sich die späteren Inhalte, aufgrund der modularen Struktur des Buches, größtenteils unabhängig von anderen erschließen.

Nun bleibt uns also nur noch Ihnen bei der Lektüre dieses Buches viel Spaß zu wünschen. Hoffentlich gelingt es uns, Ihre Neugierde in vielen Aspekten zu befriedigen und Ihr Interesse für das zu wecken, was es noch zu entdecken gibt.

Philip Bechtle,  
Florian Bernlochner,  
Herbi Dreiner,  
Christoph Hanhart,  
Josef Jochum,  
Jörg Pretz  
und  
Kristin Riebe



# Ein Buch als Netz: Doppelseiten und Verweise



## 1 Die Welt der Teilchen

Was ist das eigentlich, Teilchenphysik? Dieser Frage kann man sich von verschiedenen Seiten nähern: über die Objekte, die untersucht werden, die Fragen, die beantwortet werden sollen oder die Geräte, die benutzt werden. Auch kann man die Teilchenphysik in Abgrenzung zu anderen Naturwissenschaften betrachten – all diese verschiedenen Zugänge finden Sie in diesem Kapitel. Natürlich werden die ganz verschiedenen Aspekte der Teilchenphysik, die hier nur grob angerissen werden, im weiteren Verlauf des Buches wieder aufgegriffen und vertieft. Wir wollen dieses Kapitel als eine Einladung an Sie verstanden wissen, mit uns durch dieses Buch auf eine spannende Reise zu den tiefen Einsichten und den offenen Fragen der modernen Kern- und Teilchenphysik zu gehen.



# Ein Buch als Netz: Doppelseiten und Verweise

4

1 Die Welt der Teilchen

Was ist Teilchenphysik

5

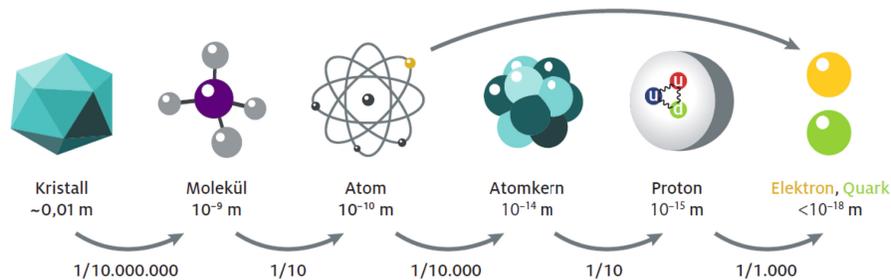
## Was ist Teilchenphysik

Eine fundamentale Wissenschaft im Wechselspiel mit anderen

Auf einen Satz gebracht ist es das Ziel der Teilchenphysik, die fundamentalen Bausteine (↓) der Natur und die Gesetze, nach denen sie miteinander wechselwirken (↓), zu finden. Die Suche ist nicht neu; das Wissen, das wir heute haben, dagegen schon: Mit zunehmend verfeinerten experimentellen und theoretischen Methoden sind viele Generationen von Forschenden immer tiefer in die Materie eingedrungen und haben der Natur immer fundamentalere Geheimnisse entlockt. Den gegenwärtigen Stand dieser spannenden Suche stellen wir in diesem Buch vor.

Machen das nicht alle Naturwissenschaften? Ja, aber dennoch ist es möglich, die verschiedenen Bereiche voneinander abzugrenzen. Sehen wir uns dazu das Bild unten an. Hier werden Objekte sehr unterschiedlicher Größe gezeigt und entsprechend befassen sich unterschiedliche Bereiche der Physik mit deren Un-

tersuchung. So sind unter anderem Kristalle Untersuchungsobjekte der Festkörperphysik. Moleküle und Atome werden in der Molekül- und Atomphysik untersucht – diese und vor allem deren Reaktionen untereinander sind natürlich auch Forschungsgegenstand der Chemie; und baut man damit komplexere Strukturen, bewegen wir uns im Bereich der Biologie. Die Wechselwirkung von Licht mit Materie ist Forschungsgegenstand der (Quanten-)Optik. Befasst man sich mit noch kleineren Objekten, den Atomkernen oder gar den Bausteinen ihrer Bausteine, den Quarks, dann befindet man sich in der Kern- oder Teilchenphysik. Die letzten beiden Disziplinen haben einen großen Überlapp, und wir wollen in diesem Buch nicht immer zwischen ihnen unterscheiden. Spannend ist, dass sich die Physik des Allergrößten, die Astronomie oder gar die Kosmologie, und die Physik des Allerkleinsten, die Teilchenphysik, begegnen: Nur gemeinsam können sie die Ge-



Was findet man, wenn man einen Kristall in seine Bausteine zerlegt?

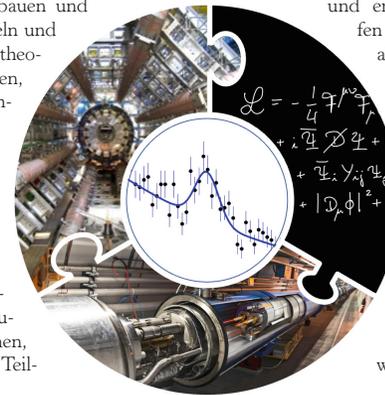
Die Elementarteilchen → S. 10  
Die vier Grundkräfte der Natur → S. 12

schichte und Zusammensetzung des Universums (↓) sowie die elementare Struktur der Materie erkunden. Das entscheidende Element, das die Teilchenphysik von anderen Bereichen der Physik abgrenzt, ist also ihre Suche nach den fundamentalen Bausteinen und welche Kräfte zwischen ihnen wirken – und natürlich auch, wie daraus die uns umgebende Materie entsteht.

Eine hilfreiche Analogie zum Vorgehen der Teilchenphysik ist der Indizien-Beweis in der Kriminologie: Wir sehen, was vorgefallen ist (z. B. dass es im Universum fast keine Antimaterie (↓) gibt, obwohl im Urknall eigentlich Materie und Antimaterie in nahezu gleicher Zahl entstanden sein sollten) und versuchen zu ergründen, wie es dazu gekommen sein kann. Das Ermittlungsteam der Teilchenphysik hat viele beteiligte Gruppen: die Forschenden der Experimentalphysik, die Detektoren entwickeln, bauen und betreiben, Beweise einsammeln und Hypothesen testen; die der theoretischen Physik, die versuchen, entweder für die Beobachtungen ein beschreibendes mathematisches Modell zu finden oder eine bestehende Theorie zu höherer Genauigkeit auszuarbeiten, um der Beobachtung gerecht zu werden; und nicht zuletzt die Forschenden der Beschleunigerphysik, die all die Untersuchungen erst möglich machen, indem sie die notwendigen Teilchenstrahlen der passenden Energie bereitstellen. Auch leisten jede Menge enga-

gierte und hochqualifizierte Technikerinnen und Techniker ihren wertvollen Beitrag zu diesem spannenden Bereich der Grundlagenforschung. Die speziellen Momente in dieser Art der Forschung entstehen, wenn ein Puzzelstück auf seinen Platz rückt und den Blick auf größere Zusammenhänge erlaubt, die einem vorher verschlossen waren; eben ähnlich dem Kriminalisten, dem auf einmal aufgeht, wie all die Hinweise auf die Lösung des Falles weisen. Aber an dem Punkt geht die Grundlagenforschung weiter: Mindestens genauso aufregend ist es, wenn eine Vorhersage, an der man mitgearbeitet hat, experimentell bestätigt wird. Es sind diese Momente, die einen Beruf in der Teilchenphysik so besonders, so spannend machen.

In diesem Buch werden wir die verschiedenen Bereiche der Kern- und Teilchenphysik vorstellen und erzählen, wie sie ineinandergreifen und sich ergänzen. Vor allem aber wollen wir berichten, wo wir mit der Teilchenphysik stehen: Welch wunderbaren Schatz, welch fantastische kulturelle Errungenschaft das sogenannte *Standardmodell* der Elementarteilchenphysik darstellt, wie erfolgreich es ist – aber auch, wo es an seine Grenzen stößt, was es nicht erklären kann und mit welchen Methoden man der Natur zu entlocken versucht, wie eine mögliche noch fundamentalere Theorie der Welt aussehen kann.



Die Entdeckung des Higgs-Bosons – eine enge Zusammenarbeit aus Theorie, Beschleuniger- und Experimentalphysik

Die Entwicklung des Universums → S. 322  
Was ist Antimaterie? → S. 18



UNIVERSITÄT BONN

# Ein Buch als Netz: Doppelseiten und Verweise

4

1 Die Welt der Teilchen

Was ist Teilchenphysik

5

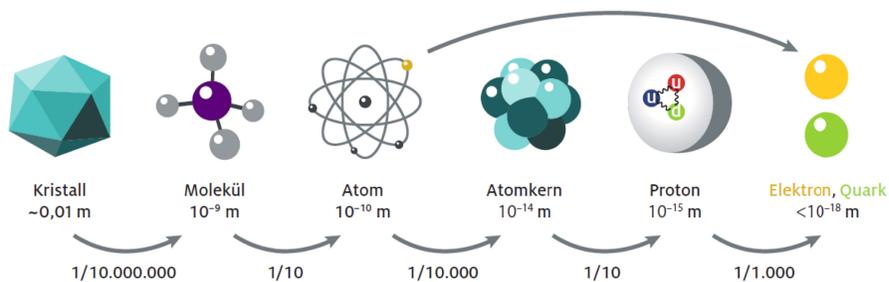
## Was ist Teilchenphysik

Eine fundamentale Wissenschaft im Wechselspiel mit anderen

Auf einen Satz gebracht ist es das Ziel der Teilchenphysik, die fundamentalen Bausteine (↓) der Natur und die Gesetze, nach denen sie miteinander wechselwirken (↓), zu finden. Die Suche ist nicht neu; das Wissen, das wir heute haben, dagegen schon: Mit zunehmend verfeinerten experimentellen und theoretischen Methoden sind viele Generationen von Forschenden immer tiefer in die Materie eingedrungen und haben der Natur immer fundamentalere Geheimnisse entlockt. Den gegenwärtigen Stand dieser spannenden Suche stellen wir in diesem Buch vor.

Machen das nicht alle Naturwissenschaften? Ja, aber dennoch ist es möglich, die verschiedenen Bereiche voneinander abzugrenzen. Sehen wir uns dazu das Bild unten an. Hier werden Objekte sehr unterschiedlicher Größe gezeigt und entsprechend befassen sich unterschiedliche Bereiche der Physik mit deren Un-

tersuchung. So sind unter anderem Kristalle Untersuchungsobjekte der Festkörperphysik. Moleküle und Atome werden in der Molekül- und Atomphysik untersucht – diese und vor allem deren Reaktionen untereinander sind natürlich auch Forschungsgegenstand der Chemie; und baut man damit komplexere Strukturen, bewegen wir uns im Bereich der Biologie. Die Wechselwirkung von Licht mit Materie ist Forschungsgegenstand der (Quanten-)Optik. Befasst man sich mit noch kleineren Objekten, den Atomkernen oder gar den Bausteinen ihrer Bausteine, den Quarks, dann befindet man sich in der Kern- oder Teilchenphysik. Die letzten beiden Disziplinen haben einen großen Überlapp, und wir wollen in diesem Buch nicht immer zwischen ihnen unterscheiden. Spannend ist, dass sich die Physik des Allergrößten, die Astronomie oder gar die Kosmologie, und die Physik des Allerkleinsten, die Teilchenphysik, begegnen: Nur gemeinsam können sie die Ge-



Was findet man, wenn man einen Kristall in seine Bausteine zerlegt?

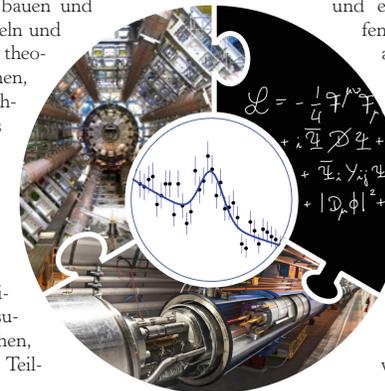
Die Elementarteilchen → S. 10  
Die vier Grundkräfte der Natur → S. 12

schichte und Zusammensetzung des Universums (↓) sowie die elementare Struktur der Materie erkunden. Das entscheidende Element, das die Teilchenphysik von anderen Bereichen der Physik abgrenzt, ist also ihre Suche nach den fundamentalen Bausteinen und welche Kräfte zwischen ihnen wirken – und natürlich auch, wie daraus die uns umgebende Materie entsteht.

Eine hilfreiche Analogie zum Vorgehen der Teilchenphysik ist der Indizien-Beweis in der Kriminologie: Wir sehen, was vorgefallen ist (z. B. dass es im Universum fast keine Antimaterie (↓) gibt, obwohl im Urknall eigentlich Materie und Antimaterie in nahezu gleicher Zahl entstanden sein sollten) und versuchen zu ergründen, wie es dazu gekommen sein kann. Das Ermittlungsteam der Teilchenphysik hat viele beteiligte Gruppen: die Forschenden der Experimentalphysik, die Detektoren entwickeln, bauen und betreiben, Beweise einsammeln und Hypothesen testen; die der theoretischen Physik, die versuchen, entweder für die Beobachtungen ein beschreibendes mathematisches Modell zu finden oder eine bestehende Theorie zu höherer Genauigkeit auszuarbeiten, um der Beobachtung gerecht zu werden; und nicht zuletzt die Forschenden der Beschleunigerphysik, die all die Untersuchungen erst möglich machen, indem sie die notwendigen Teilchenstrahlen der passenden Energie bereitstellen. Auch leisten jede Menge enga-

gierte und hochqualifizierte Technikerinnen und Techniker ihren wertvollen Beitrag zu diesem spannenden Bereich der Grundlagenforschung. Die speziellen Momente in dieser Art der Forschung entstehen, wenn ein Puzzlestück auf seinen Platz rückt und den Blick auf größere Zusammenhänge erlaubt, die einem vorher verschlossen waren; eben ähnlich dem Kriminalisten, dem auf einmal aufgeht, wie all die Hinweise auf die Lösung des Falles weisen. Aber an dem Punkt geht die Grundlagenforschung weiter: Mindestens genauso aufregend ist es, wenn eine Vorhersage, an der man mitgearbeitet hat, experimentell bestätigt wird. Es sind diese Momente, die einen Beruf in der Teilchenphysik so besonders, so spannend machen.

In diesem Buch werden wir die verschiedenen Bereiche der Kern- und Teilchenphysik vorstellen und erzählen, wie sie ineinandergreifen und sich ergänzen. Vor allem aber wollen wir berichten, wo wir mit der Teilchenphysik stehen: Welch wunderbaren Schatz, welch fantastische kulturelle Errungenschaft das sogenannte *Standardmodell* der Elementarteilchenphysik darstellt, wie erfolgreich es ist – aber auch, wo es an seine Grenzen stößt, was es nicht erklären kann und mit welchen Methoden man der Natur zu entlocken versucht, wie eine mögliche noch fundamentalere Theorie der Welt aussehen kann.



Die Entdeckung des Higgs-Bosons – eine enge Zusammenarbeit aus Theorie, Beschleuniger- und Experimentalphysik

Die Entwicklung des Universums → S. 322  
Was ist Antimaterie? → S. 18

# Ein Buch als Netz: Doppelseiten und Verweise

12

1 Die Welt der Teilchen

Die vier Grundkräfte der Natur

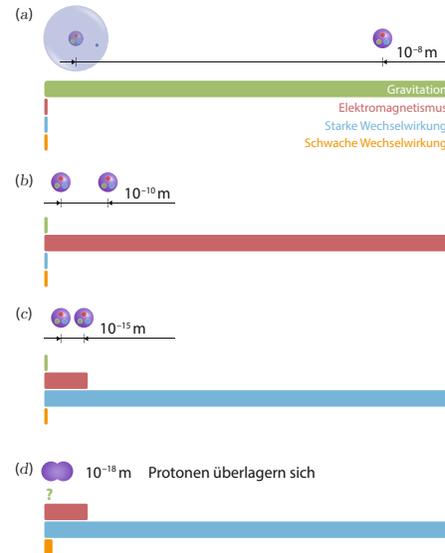
13

## Die vier Grundkräfte der Natur

Vier sehr ungleiche Partner

Wir kennen vier fundamentale Kräfte: die Gravitation, den Elektromagnetismus, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung. Die letzten drei sind im Standardmodell der Elementarteilchenphysik zusammengefasst. Die Wechselwirkungen des Standardmodells sind alle nach dem gleichen Prinzip aufgebaut: Die Kräfte werden durch den Austausch von Austauscheteilchen vermittelt. Man nimmt an, dass das auch für die Gravitation gilt. Die vier Grundkräfte unterscheiden sich drastisch in Reichweite ( $\downarrow$ ) und Stärke und sind dementsprechend für sehr unterschiedliche Systeme relevant, die deshalb sehr unterschiedliche Eigenschaften entwickeln (Skalen  $\downarrow$ ).

Um das gerade Gesagte zu verdeutlichen, möchten wir Sie auf eine Reise, eine „Gedanken“-Reise, einladen. Stellen Sie sich vor, wir reisen auf einem Proton und nähern uns einem Wasserstoffatom – also einem anderen Proton mit einem Elektron in seiner umgebenden Hülle. Beginnen wir unsere Reise bei  $1\ \mu\text{m}$  (also  $10^{-6}\ \text{m}$  – in etwa die Dicke eines Haares) Abstand von dem nach außen elektrisch neutralen Atom, welches etwa  $10^{-10}\ \text{m}$  groß ist (siehe Bild, a). Aus dieser Entfernung heben sich die Wirkungen der elektrischen Ladungen von Elektron und Proton im Wasserstoffatom auf. Dadurch wird der Elektromagnetismus abgeschirmt und die sehr schwache Anziehung der Gravitation ist die einzige Kraft, die nennenswert auf unser Proton wirkt, wodurch es zu dem Atom hingezogen wird. Das ändert sich jedoch drastisch, sobald wir auf atomare Abstände an den Atomkern herankommen, also in die Elektronenhülle eindringen (b). Nun „sieht“ unser



Die relative Wichtigkeit der Grundkräfte bei verschiedenen Abständen – die Balkenlänge deutet die relative Stärke der Kräfte an.

positiv geladenes Proton den ebenfalls positiv geladenen Atomkern. Zwar ist die Gravitationskraft wegen des kleineren Abstands nun 100 Millionen mal stärker als zuvor, aber das ist vernachlässigbar wenig gegen die elektromagnetische Abstoßung, die unser Proton nun zu spüren bekommt. Die Gravitation ist bei diesen Ab-

ständen über 30 Größenordnungen schwächer als der Elektromagnetismus, vermittelt durch den Austausch von Photonen. Andererseits befinden wir uns noch viel zu weit von dem Atomkern entfernt, als dass die starke Wechselwirkung schon eine Rolle spielen könnte. Hier draußen ist diese selbst gegen die Gravitation noch vernachlässigbar. Die Vielfalt der uns umgebenden Natur ist somit vor allem vom Elektromagnetismus bestimmt. Er lässt beispielsweise Farben leuchten und hält all die vielen Stoffe um uns herum, wie Holz, Steine und Metall, zusammen. Die Effekte der starken Wechselwirkung sind indirekt, da sie (im Wechselspiel mit dem Elektromagnetismus) festlegt, welche Atomkerne ( $\downarrow$ ) mit welchen Kernladungen stabil sind.

Um die Reise fortzusetzen, stellen wir uns vor, dass wir schnell genug sind, um die erwähnte elektrische Abstoßung zu überwinden (c). Dann passiert etwas Drastisches, sobald unser Proton einen weiteren Faktor 100.000 näher an das Kern-Proton herangekommen ist (wir ignorieren jetzt mal, dass die Protonen nicht unterscheidbar sind, obwohl dies zu spannenden Effekten führt – siehe Artikel zu Fermionen und Bosonen  $\downarrow$ ): Die starke Kraft setzt ein, und zwar zunächst über den Austausch leichter Quark-Antiquark-Systeme – nun hat der Elektromagnetismus keine Chance mehr.

Bei noch kleineren Abständen ( $< 10^{-15}\ \text{m}$ ) beginnen die Protonen zu überlappen (d). Nun wird die starke Kraft direkt durch den Austausch von Gluonen zwischen den Bausteinen der Protonen, den Quarks, vermittelt. An der Hierarchie zwischen den Kräften ändert das jedoch wenig: Die starke Kraft ist weiterhin die stärkste, danach folgt die elektromagnetische. Allerdings wird bei diesen kleinen Abständen auch die schwache Wechselwirkung, vermittelt durch den Aus-

tausch von  $W$ - und  $Z$ -Bosonen, relativ stark. Bei einem Abstand von  $10^{-18}\ \text{m}$  ist sie jedoch immer noch einen Faktor 10.000 schwächer als die starke Kraft und einen Faktor 100 schwächer als der Elektromagnetismus. Bei solch kleinen Abständen kann man der Gravitation keine Kraft mehr zuordnen, da innerhalb eines Protons eine hohe Energiedichte herrscht und somit die Gravitation nicht nur zwischen den Quarks wirkt – hier wäre dann eine Quantengravitation notwendig, für die es noch keine Theorie gibt.

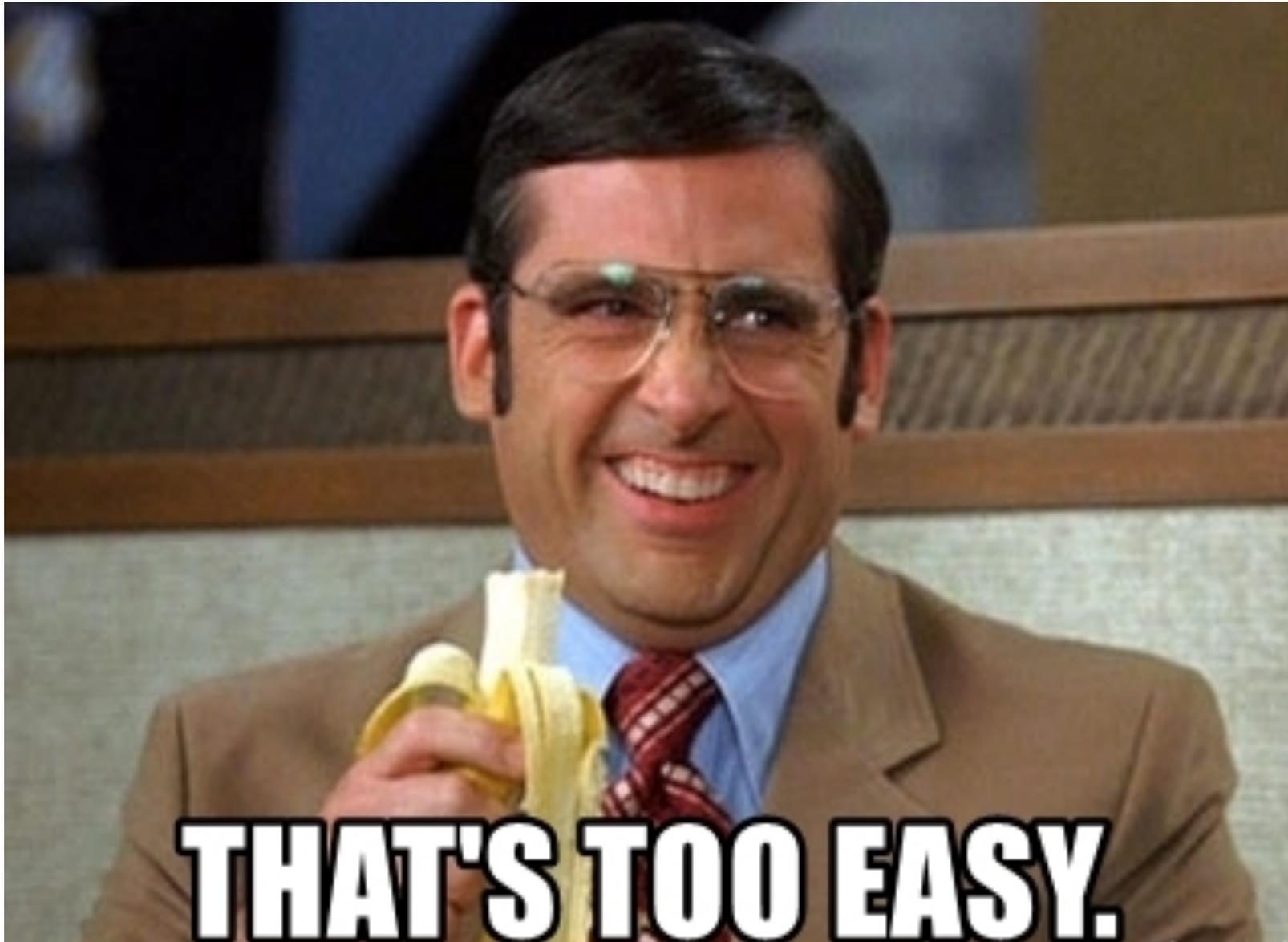
Welche Kraft dominiert, hängt demnach davon ab, wie nahe sich die untersuchten Teilchen kommen. Aber auch davon, welche Teilchen beteiligt sind. Wie stark die Kräfte z.B. bei einem gegebenen Abstand sind, hängt dann sowohl von der Masse des Austauschteilchens als auch von der Wahrscheinlichkeit ab, dass ein Materieteilchen ein solches Austauschteilchen abstrahlt. So ist bei kleinen Abständen, wie oben ausgeführt, die starke Wechselwirkung zwischen Quarks sehr viel wichtiger als z.B. der Elektromagnetismus, aber zwischen Elektronen spielt sie keine Rolle, da Elektronen keine Gluonen abstrahlen.

Unter den Kräften des Standardmodells nimmt die schwache Wechselwirkung eine Sonderrolle ein: Sie ist so schwach und kurzreichweitig, dass sie keine stabilen Strukturen ausbilden kann. Allerdings ist sie die einzige Wechselwirkung, die Teilchentypen ändert – sie kann z.B. ein down-Quark in ein up-Quark umwandeln. Das passiert z.B. im Neutron- $\beta$ -Zerfall (Produktion und Zerfall  $\downarrow$ ). Ohne die schwache Wechselwirkung wären Neutronen stabil. Außerdem braucht all die reichhaltige Physik der Neutrinos die schwache Wechselwirkung, aber diese Geschichte wird in anderen Artikeln erzählt.

Über die Reichweite von Wechselwirkungen → S. 54  
Längenskalen und Einheiten → S. 8

Von Nukleonen zu Kernen → S. 210  
Fermionen und Bosonen → S. 90  
Produktion, Zerstörung und Zerfall von Teilchen → S. 50

# Was sich gut in die Struktur einbetten lässt



# Natürlich aufteilbare Inhalte

62

3 Experimentelle Grundlagen

Wie funktioniert ein Beschleuniger?

63

## Wie funktioniert ein Beschleuniger?

Mit elektrischen Feldern zu hohen Energien

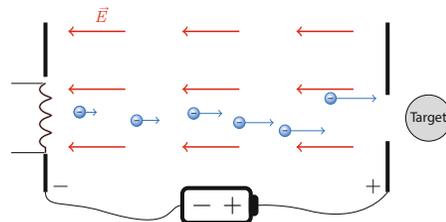
Eines der Hauptwerkzeuge der Elementarteilchenphysik sind Teilchenbeschleuniger. Wie der Name schon sagt, dienen sie dazu, Teilchen auf eine bestimmte Energie zu beschleunigen. Trifft dann ein daraus resultierender Teilchenstrahl auf Materie oder kollidieren zwei Teilchenstrahlen miteinander, kann man bei den dabei auftretenden Streuvorgängen (↓) viele interessante Dinge lernen.

Aber wie erzeugt man nun hochenergetische Teilchenstrahlen? Ähnlich wie ein Körper beim Fallen im Gravitationsfeld der Erde beschleunigt wird, erfährt ein geladenes Teilchen eine Beschleunigung in einem elektrischen Feld, das zum Beispiel zwischen zwei unterschiedlich geladenen Platten entsteht. Das ist auch schon das Grundprinzip jedes Beschleunigers. Eine Braun'sche Röhre, wie sie früher in jedem Fernseher verwendet wurde, ist im Grunde genommen ein Teilchenbeschleuniger! Nach Durchlaufen der Beschleunigungsstrecke treffen die Teilchen dann zum Beispiel auf ein *Target*, wie das zu untersuchende Objekt bezeichnet wird.

Wenn ein Teilchen eine Spannung durchläuft, gewinnt es dabei eine Energie, die gleich dem Produkt aus dem Betrag seiner Ladung und der durchlaufenen Spannung ist. In der Teilchenphysik hat sich die entsprechende Einheit Elektronenvolt (eV) als Energieeinheit eingebürgert. Durchläuft ein Teilchen mit einer Elementarladung eine Spannung von einem Volt, gewinnt es eine Energie von  $1\text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$  Joule (Energie und Leistung ↓). Man kann ein Teilchen nicht beliebig mit dieser Methode beschleunigen, da es ab einer bestimmten Spannung zu elektrischen Überschlügen (Blitzen) zwischen den beiden Platten kommt.

Ein Ausweg, um diese Begrenzung zu umgehen, ist die Verwendung von elektrischen Wechselfeldern. Im oberen Teil der Abbildung auf der nächsten Seite werden die negativ geladenen Teilchen durch den positiv geladenen ersten und dritten Zylinder angezogen. Befinden sich die Teilchen dann im abgeschirmten inneren Bereich der Zylinder, wird die Spannung umgepolt und es erfolgt eine Beschleunigung zwischen dem ersten und zweiten bzw. dem dritten und vierten Zylinder. Auf diese Weise lassen sich im Prinzip beliebig hohe Teilchenenergien erreichen, doch der Beschleuniger wird dafür immer länger. Ein Beispiel für einen solchen Linearbeschleuniger ist der Stanford Linear Accelerator in den USA mit einer Länge von über drei Kilometern. Um noch höhere Energien zu erreichen, kam man auf

die Idee, die Teilchen eine solche Beschleunigersektion mehrmals durchlaufen zu lassen. Damit gelangt man zu einem ringförmigen Aufbau. Der Strahl wird von einem Vorbeschleuniger eingeschossen und durchläuft den Beschleunigerring viele tausend Mal. Ablenkermagnete dienen dazu, die Teilchen auf einer Kreisbahn zu halten. Die eigentliche Beschleunigersektion macht dabei nur einen kleinen Bruchteil des Rings aus. Nach Erreichen der Endenergie kann der Teilchenstrahl dann zum Beispiel auf ein Target gelenkt werden. Auch hier stößt man irgendwann an Grenzen, da entweder der Radius oder das Magnetfeld immer weiter vergrößert werden müssen, um zu höheren Energien zu gelangen. Eine Möglichkeit, die Teilchenenergie, die in einem Streuvorgang zur Verfügung steht, dennoch weiter zu erhöhen, besteht darin, zwei Teilchenstrahlen miteinander kollidieren zu lassen, wie es beim Large Hadron Collider am CERN (↓) praktiziert wird.

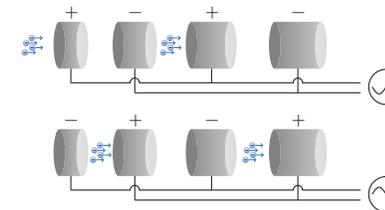


Prinzip eines Beschleunigers. Aus einer Glühkathode treten Elektronen aus, die in einem elektrischen Feld beschleunigt werden und dann auf ein Target treffen.

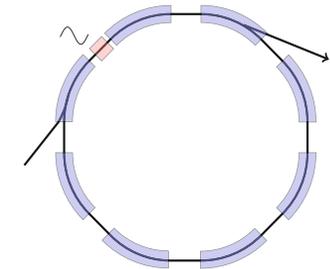
Das Prinzip von Streuexperimenten → S. 46  
Energie und Leistung → S. 32

die Idee, die Teilchen eine solche Beschleunigersektion mehrmals durchlaufen zu lassen. Damit gelangt man zu einem ringförmigen Aufbau. Der Strahl wird von einem Vorbeschleuniger eingeschossen und durchläuft den Beschleunigerring viele tausend Mal. Ablenkermagnete dienen dazu, die Teilchen auf einer Kreisbahn zu halten. Die eigentliche Beschleunigersektion macht dabei nur einen kleinen Bruchteil des Rings aus. Nach Erreichen der Endenergie kann der Teilchenstrahl dann zum Beispiel auf ein Target gelenkt werden. Auch hier stößt man irgendwann an Grenzen, da entweder der Radius oder das Magnetfeld immer weiter vergrößert werden müssen, um zu höheren Energien zu gelangen. Eine Möglichkeit, die Teilchenenergie, die in einem Streuvorgang zur Verfügung steht, dennoch weiter zu erhöhen, besteht darin, zwei Teilchenstrahlen miteinander kollidieren zu lassen, wie es beim Large Hadron Collider am CERN (↓) praktiziert wird.

Beschleuniger sind nicht nur Werkzeuge der Teilchenphysik, sondern finden auch Anwendung in anderen Bereichen, wie der Materialforschung (↓) oder der Medizin (↓).



Das Prinzip eines Linearbeschleunigers mit elektrischen Wechselfeldern nach Rolf Wideröe. Die Teilchen werden von links nach rechts beschleunigt. Das obere Bild zeigt die Situation zur Zeit  $t = 0$ , das untere zu einem späteren Zeitpunkt.



Aufbau eines Synchrotrons. In Rot die Beschleunigersektion, in Blau die Ablenkermagnete. Der Name Synchrotron rührt daher, dass mit zunehmender Teilchenenergie das Feld der Ablenkermagnete synchron erhöht werden muss, um den Radius der Teilchenbahn konstant zu halten.



Das Synchrotron COSY am Forschungszentrum Jülich. Der Beschleuniger hat einen Umfang von etwa 180 Metern. Er erlaubt Protonen und Deuteronen (gebundener Zustand aus Proton und Neutron) zu beschleunigen. Die orangefarbenen Elemente sind Ablenkermagnete, um die Teilchen auf einer Kreisbahn zu halten.

Video zum Synchrotron COSY am Forschungszentrum Jülich:  
<https://www.youtube.com/watch?v=MXNOVTF3utE>  
Der LHC-Beschleunigerkomplex am CERN → S. 112  
Materialforschung: Synchrotronstrahlung → S. 122  
Beschleuniger in der Medizin → S. 118

# Natürlich aufteilbare Inhalte

64

3 Experimentelle Grundlagen

Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie

65

## Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie

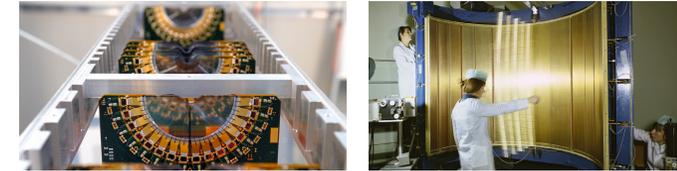
Warum wir überhaupt Teilchen in Messgeräten nachweisen können

Damit die Teilchen, die wir untersuchen wollen, im Detektor registriert und vermessen werden können, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein: Sie müssen mit dem Detektormaterial wechselwirken, und die Reaktion des Detektormaterials auf diese Wechselwirkung muss registriert werden können. Letzteres geschieht typischerweise durch elektronische Signale (Halbleiterdetektoren  $\downarrow$ ). In diesem Artikel behandeln wir nur den ersten Teil dieses Messprozesses: Die Wechselwirkung zwischen Teilchen und Material.

Aus den bekannten Wechselwirkungen ( $\downarrow$ ) kommt dafür der Elektromagnetismus ( $\downarrow$ ) und die starke Kraft ( $\downarrow$ ) in Frage. Die Gravitation und die schwache Kraft sind viel zu schwach zur Erzeugung von elektronischen Signalen in den Detektoren. Dennoch kann die schwache Kraft mit Detektoren untersucht werden, wenn z. B. in Neutrinoexperimenten ein Neutrino durch die schwache Wechselwirkung ein geladenes hochenergetisches Teilchen im Detektormaterial hervorbringt, welches mittels des Elektromagnetismus weiter untersucht werden kann. Es hängt vom Material des Detektors und vom zu untersuchenden Teilchentyp ab, wie genau diese Wechselwirkung abläuft. Das bedeutet, dass ein komplettes Teilchenphysikexperiment typischerweise aus verschiedenen Detektortypen aufgebaut ist: Unterschiedliche Arten von Messungen werden von unterschiedlichen Detektoren an unterschiedlichen Teilchen vorgenommen. Die Unterschiede in der Art der Wechselwirkung können dann genutzt werden, um verschiedene Arten von Teilchen experimentell zu unterscheiden ( $\downarrow$ ).

Bei allen elektrisch geladenen Teilchen kann der Elektromagnetismus als Wechselwirkung zwischen Teilchen und Detektor zur Messung verwendet werden. Der Detektor muss so konstruiert werden, dass alle Teilchen, die untersucht werden sollen, in einem zum Detektor passenden Energiebereich liegen.

Die Energie und die Masse (Anwendungen der speziellen Relativitätstheorie  $\downarrow$ ) des Teilchens entscheiden auch darüber, wie genau das elektrisch geladene Teilchen mittels des Elektromagnetismus mit dem Detektormaterial wechselwirkt. Das Teilchen kann einfach nur im elektrischen Feld der Atomkerne abgelenkt werden und dabei den Kern „anschubsen“, ihm also dadurch einen Teil seiner Energie übertragen. Dies kann bei jeder Energie der Teilchen geschehen, ist aber nur bei sehr geringer Energie der Teilchen der dominierende Prozess. Er kann meist nicht zur Messung verwendet werden. Anders verhält es sich, wenn das Teilchen ein Hüllenelektron auf ein höheres Energieniveau anhebt: Das Hüllenelektron begibt sich durch Aussendung eines Photons wieder zurück auf sein ursprüngliches Energieniveau. Wenn das Material für die Wellenlänge des Photons durchsichtig ist, kann das Photon als Lichtsignal elektronisch registriert werden. Diesen Prozess nennt man *Scintillation*. Während dieser Prozess für den elektronischen Nachweis der Teilchen sehr wichtig ist, trägt er doch wenig zum Energieübertrag vom Teilchen zum Material bei, er bremst die hochenergetischen Teilchen also kaum. Deren Energie liegt so weit über der Bindungsenergie der Elektronen im Atom, dass sie kaum gebremst werden.

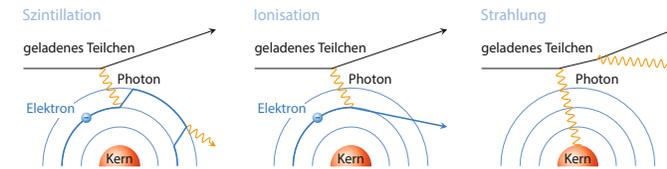


Zwei Beispiele für verschiedene Detektortypen: Mit einem Silizium-Vertexdetektor wird Ionisation im Silizium benutzt. In einer Driftkammer ionisiert ein Teilchen ein Gas entlang seiner Spur.

Bei etwas höherer Energie, wenn das Teilchen eine Bewegungsenergie deutlich oberhalb der Ionisationsenergie der Atome des Materials, aber unterhalb von etwa dem hundertfachen seiner Ruhemasse (SRT  $\downarrow$ ) besitzt, ist die *Ionisation* des Detektormaterials ein dominanter Prozess. Dabei hebt das Teilchen die Hüllenelektronen nicht auf eine höhere Stufe, sondern stößt sie aus dem Atom heraus. Es entsteht ein geladenes Ion und ein freies Elektron, das als elektrisches Signal verstärkt und elektronisch registriert werden kann.

Übersteigt die Energie des Teilchens in etwa das hundertfache seiner Ruhemasse, wird die *Strahlung* zum dominanten Prozess der Energieübertragung. Dabei erzeugt das einfallende Teilchen hochenergetische Photonen, an die es je etwa die Hälfte seiner Energie abgibt. Dieser Prozess setzt sich in einer Kaskade fort, bis die Energie zu niedrig wird (Energimessung  $\downarrow$ ). Bei sehr leichten Teilchen wie Elektronen spielt dieser Prozess schon bei recht niedrigen Energien von etwa 100 MeV eine große Rolle für den Bau von Detektoren, bei schweren Teilchen typischerweise in der Praxis gar keine.

Die verschiedenen für den Nachweis der Teilchen im Detektor wichtigen Arten der Energieübertragung in schematischer Darstellung



Halbleiterdetektoren  $\rightarrow$  S. 66  
 Die vier Grundkräfte der Natur  $\rightarrow$  S. 12  
 Elektromagnetismus  $\rightarrow$  S. 164  
 Starke Kraft: Quantenchromodynamik  $\rightarrow$  S. 190  
 Signaturen von Teilchen  $\rightarrow$  S. 76

Anwendungen der speziellen Relativitätstheorie  $\rightarrow$  S. 88  
 SRT: Spezielle Relativitätstheorie  $\rightarrow$  S. 34  
 Energimessung von Teilchen  $\rightarrow$  S. 74  
 Was ist Antimaterie?  $\rightarrow$  S. 18



UNIVERSITÄT BONN

# Natürlich aufteilbare Inhalte

66

3 Experimentelle Grundlagen

Halbleiterdetektoren

67

## Halbleiterdetektoren

Die Multitalente: von der Handykamera bis zum LHC

Die meisten Menschen tragen mit der Handykamera Millionen von kleinen Halbleiterdetektoren mit sich herum. Auch in der Teilchenphysik spielen sie eine herausragende Rolle. Ob ein Material elektrischen Strom leiten kann, hängt davon ab, wie stark die Elektronen an die Atome gebunden sind.

In Festkörpern überlagern sich die Wellenfunktionen einzelner Elektronenniveaus so sehr, dass die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen über den Festkörper nahezu konstant ist. Deshalb spricht man statt von Wellenfunktionen von Bändern des Festkörpers. Die freie Bewegung von Elektronen und damit Stromfluss sind aber nicht möglich, wenn alle möglichen Elektronenniveaus eines Bandes besetzt sind, denn dann verbietet das Pauli-Prinzip die Bewegung der Elektronen von einem Niveau zum nächsten. Metalle sind elektrisch leitfähig, da es hier nur teilweise besetzte Bänder gibt, sogenannte *Leitungsbande*. Ein vollständig besetztes Band nennen wir *Valenzband*. Das ist in Isolatoren der Fall.

Kommerzielle Germaniumdetektoren montiert auf Gefäßen für flüssigen Stickstoff



Germaniumdetektoren des LEGEND Neutrinoexperimentes



Halbleiter sind im Grunde Isolatoren. Es genügt aber eine relativ geringe Energie (typischerweise  $\approx 3$  Elektronenvolt), um Elektronen vom Valenzband in das freie Leitungsband zu befördern. Dies kann im einfachsten Falle durch thermische Anregung geschehen, weshalb bei steigender Temperatur Halbleiter immer leitfähiger werden und ihr elektrischer Widerstand sinkt. Durch die Messung des Widerstands kann man so die Temperatur bestimmen, weshalb Halbleiter in sehr vielen Anwendungen als Thermometer eingesetzt werden.

Die Anregung von Elektronen ins Leitungsband kann aber auch durch Photonen oder elektrisch geladene Teilchen geschehen ( $\downarrow$ ). Die Anzahl der erzeugten freien Elektronen ist direkt proportional zu der von den Teilchen abgegebenen Energie. Legt man eine elektrische Spannung an und sammelt die freien Elektronen ein, kann anhand der gemessenen elektrischen Ladung die Energie des ursprünglichen Teilchens gemessen werden.

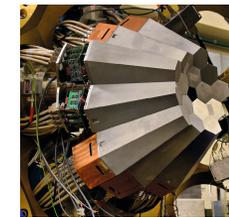
Die Energielücke zwischen Valenzband und Leitungsband, also die erforderliche Energie, um ein freies messbares Elektron zu erzeugen, beträgt nur wenige Elektronenvolt. In gasbasierten Detektoren ( $\downarrow$ ) oder Szintillatoren ( $\downarrow$ ) muss hingegen die Ionisationsenergie der Gasatome von einigen 10 eV aufgebracht werden, damit ein Signal entstehen kann. Daher werden bei gleicher Energie in Halbleiterdetektoren deutlich mehr Ladungsträger erzeugt, weshalb die Energieauflösung, die Genauigkeit der Energiemessung, aufgrund der höheren Messstatistik ( $\downarrow$ ) wesentlich besser ist.

Die Halbleitertechnologie ist sehr hoch entwickelt, und es lassen sich Halbleiterdetektoren auch als sehr kleine Strukturen in Massen produzieren. Eine Handykamera besteht aus einem Chip mit mehreren Millionen Pixeln, jedes mit einem nur mikrometergroßen Halbleiterdetektor zur Messung optischer, also mit dem Auge sichtbarer, Photonen.

Halbleiterdetektoren werden daher in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, wobei ihre Form und Größe variieren kann, von den Miniaturdetektoren in Kamerachips bis hin zu sehr großen Germaniumdetektoren mit mehreren Kilogramm Gewicht. Neben den Sensorchips in Handy- oder Digitalkameras gibt es wesentlich größere solcher Kameras an astronomischen Teleskopen. Ebenso werden Chips mit Siliziumdetektoren als abbildende Kameras auf Satelliten in der Röntgenastronomie verwendet. Ganz im Zentrum der großen Detektoren ATLAS, CMS, ALICE und LHCb am LHC-Beschleuniger befinden sich *Spurdetektoren*, auch als *Vertexdetektoren* bezeichnet. Sie bestehen aus mehreren Lagen hochpixelierter Siliziumdetektorchips zur dreidimensionalen Vermessung von Teilchenspuren.

Ein sehr breites Anwendungsgebiet von größeren Einzeldetektoren ist die Spektroskopie von Röntgen- und Gammastrahlung. Um Störungen durch thermisch angeregte Elek-

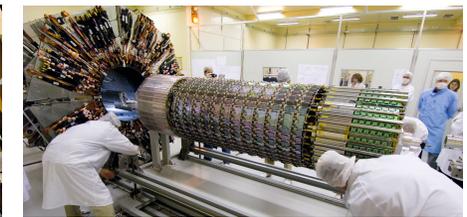
Ein Teil des AGATA-Arrays bestehend aus hexagonalen Germaniumdetektoren



tronen zu reduzieren, werden dabei die Halbleiterdetektoren bei spektroskopischen Anwendungen zur Erhöhung der Sensitivität gekühlt, meist mit flüssigem Stickstoff auf eine Temperatur von 77 K. Daher ist das äußere Erscheinungsbild von Halbleiter-Spektrometern meist durch das Gefäß für den flüssigen Stickstoff geprägt. So auch bei den Gamma-Spektrometern, die sehr häufig in der Umweltanalyse zur Suche nach radioaktiven Verunreinigungen oder zur Analyse von Spurenelementen eingesetzt werden.

Die größten Halbleiterdetektoren mit einigen Kilogramm an Gewicht bestehen aus hochreinem Germanium und sind in der Teilchenphysik zu finden. Das Advanced Gamma Tracking Array (AGATA) zur Untersuchung der Struktur von Atomkernen besteht aus 180 Germaniumdetektoren, die in einer Kugelschale angeordnet sind. Damit wird nicht nur die Energie, sondern auch die Emissionsrichtung von Gammaquanten aus kernphysikalischen Reaktionen sehr genau vermessen. Um die Orte der Absorption der Gammaquanten genauer zu bestimmen, besitzt jeder einzelne der etwa 2,4 Kilogramm schweren Detektoren 36 auf der Oberfläche verteilte Kontakte zur Auslese der erzeugten Ladungen.

Einbau des ATLAS-Spurdetektors bestehend aus vielen Siliziumdetektor-Chips



Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie  $\rightarrow$  S. 64  
 Gasbasierte Detektoren  $\rightarrow$  S. 68  
 Szintillatoren und Photomultiplier  $\rightarrow$  S. 70  
 Statistik  $\rightarrow$  S. 80

# Natürlich aufteilbare Inhalte

76

3 Experimentelle Grundlagen

Signaturen von Teilchen

77

## Signaturen von Teilchen

### Fußabdrücke von Teilchen in den Detektoren

In den Experimenten der Teilchenphysik werden die unterschiedlichsten Teilchen verwendet und erzeugt. Ein wichtiger Aspekt der Messung ist es daher oft, die Art der in den Experimenten entstehenden, auslaufenden oder einlaufenden Teilchen für jedes den Detektor treffende Teilchen so präzise wie möglich zu bestimmen. Den Physikerinnen und Physikern kommt dabei zugute, dass die typischen verwendeten oder entstehenden Teilchen, die sich in oder durch den Detektor bewegen, deutlich unterschiedliche Kombinationen von Wechselwirkungen mit der Materie des Detektors aufweisen ( $\downarrow$ ).

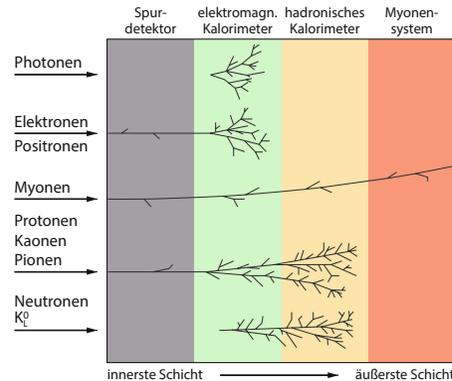
Da unterschiedlich dichte Materialien unterschiedliche Signaturen erzeugen, sind viele Teilchendetektoren aus verschiedenen Subdetektoren (Typische Detektoren  $\downarrow$ ) zusammengesetzt. Dabei wird versucht, im Vertexdetektor und Spurdetektor während der Messungen von Herkunftsort, Richtung und Impuls der elektrisch geladenen Teilchen so wenig Material wie möglich zu verwenden (Detektoren, Orts- und Impulsmessung  $\downarrow$ ). Hinter dieser Lage schließen sich die Kalorimeter (Energimessung  $\downarrow$ ) an, die aus dichtem Material bestehen. Hinter den Kalorimetern kann typischerweise nur noch eine Teilchensorte nachgewiesen werden: die Myonen, schwere Partnerteilchen der Elektronen. Für sie gibt es oft ein weiteres Spurdetektorsystem hinter den Kalorimetern.

Der Nachweis der Teilchen im Detektor nutzt immer entweder die elektromagnetische Wechselwirkung, die starke Wechselwirkung oder eine Kombination der

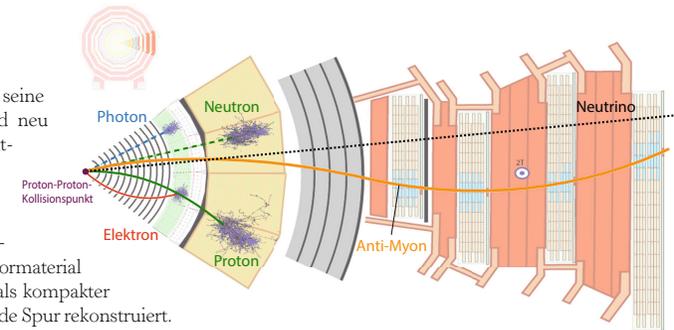
beiden – mit welcher Gewichtung, wird von den Eigenschaften der betrachteten Teilchen und ihrer Masse bestimmt. Als Beispiel seien hier die häufigsten identifizierten Teilchen in beschleunigerbasierten Experimenten genannt:

Ein *Photon* ist weder elektrisch noch unter der starken Wechselwirkung geladen und erzeugt daher typischerweise keine Spur im Spurdetektor. Es ist aber das Austauscheteilchen des Elektromagnetismus – obschon ungeladen, kann es also trotzdem mit elektrisch geladenen Teilchen wechselwirken. Zum Beispiel sind Elektronen in dichter Materie in großer Zahl vorhanden.

Die unterschiedlichen Wechselwirkungen der Teilchenarten in den verschiedenen Detektorkomponenten



Dann überträgt das Photon seine Energie auf Elektronen und neu entstehende Elektron-Positron-Paare. Diese elektrisch geladenen leichten Teilchen geben ihre Energie in einem kompakten, dichten Prozess an das Detektormaterial ab. Ein Photon wird daher als kompakter „Cluster“ ohne darauf zeigende Spur rekonstruiert.



Teilchen auf ihrer Bahn durch den CMS-Detektor. Die Farben entsprechen denen in der linken Abbildung.

Ein *Elektron* verhält sich fast genauso, ist aber leicht und elektrisch geladen. Daher ionisiert es das Material, das es durchdringt, entlang seiner Bahn. Eine Spur entsteht im Spurdetektor. Im Kalorimeter verhält es sich wie das Photon.

Ein *Myon* ist das schwere Partnerteilchen der Elektronen, seine Quantenzahlen sind identisch. Es wechselwirkt aber nicht identisch zum Elektron: Das liegt an seiner um einen Faktor 200 höheren Masse. Daher hat es mehr „Durchschlagskraft“ als ein Elektron und durchdringt auch Kalorimeter und Myondetektor als Spur. Bei den üblichen Energien der Myonen in Teilchenphysikexperimenten hat es genug Energie, um erst außerhalb des Detektors zu zerfallen.

*Geladene Hadronen* wie Protonen oder geladene Pionen unterscheiden sich von den Myonen durch ihre Eigenschaft, mit der starken Wechselwirkung agieren zu können. Die starke Kraft ist sehr stark, erzeugt also heftige Wechselwirkungen. Hadronen sind aber farbneutrale Kombinationen aus Quarks – die starke Kraft

wirkt also nur zwischen Hadronen, wenn sie sich quasi durchdringen (Confinement  $\downarrow$ , Reichweite  $\downarrow$ ). Aufgrund dieses Wechselspiels erzeugen sie unregelmäßige Cluster – unterscheiden sich also in deren Form von Elektron und Myon. Ähnlich ist es bei den neutralen Hadronen wie dem Neutron oder einem neutralen Kaon – nur ohne Spur. Und auch hier liegt der Unterschied zum Photon in der Form des Clusters im Kalorimeter.

Die einzigen Teilchen, die den meisten Detektoren entgehen, sind die *Neutrinos*. Sie wechselwirken nur mit der schwachen Wechselwirkung – also meist weit außerhalb des Detektors oder gar weit außerhalb der Erde.

Nun beginnt eine Art Puzzlespiel: Aus welcher Wechselwirkung im Vakuum der Strahlröhre mag die beobachtete Kombination aus Teilchen im Detektor entstanden sein?

Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie → S. 64  
Typische Detektoren an Beschleunigern → S. 124  
Halbleiterdetektoren → S. 66, Gasbasierte Detektoren → S. 68 und Orts- und Impulsmessung → S. 72  
Energimessung von Teilchen → S. 74

Confinement → S. 192  
Über die Reichweite von Wechselwirkungen → S. 54

# Ein Beispiel für eine Herausforderung für die Struktur



# Schwer aufteilbare Inhalte

## Die schwache Wechselwirkung

Verwandlung ist möglich

Die schwache Wechselwirkung beruht auf dem Austausch von  $W^\pm$ - und  $Z^0$ -Bosonen. Im Gegensatz zum masselosen Photon des Elektromagnetismus haben diese Bosonen eine große Masse:  $M_W = 80,4 \text{ GeV}/c^2$  und  $M_Z = 91,2 \text{ GeV}/c^2$ . Damit hat diese Kraft nur eine sehr geringe Reichweite ( $\downarrow$ ), etwa  $10^{-18} \text{ m}$ , kleiner als der Atomkernradius von  $10^{-15} \text{ m}$ . Sie spielt demzufolge in unserem unmittelbaren Alltag keine Rolle. Wie wir sehen werden, ist sie aber z. B. essenziell, damit die Sonne funktioniert, und spielt eine große Rolle in Teilchenphysikexperimenten.

Die schwache Wechselwirkung unterscheidet sich grundlegend von der elektromagnetischen und der starken Wechselwirkung dadurch, dass sie Teilchen ineinander umwandeln kann. So wird beim  $\beta$ -Zerfall des Neutrons ein  $d$ -Quark in ein  $u$ -Quark umgewandelt und dabei ein  $W^-$ -Boson abgestrahlt. Das  $W^-$ -Boson zerfällt daraufhin in ein Elektron und ein Elektron-Neutrino (Produktion und Zerfall  $\downarrow$ ).

Weitere Beispiele sind die Zerfälle des Myons, sowie des Pions, die bei den kosmischen Strahlen, die auf die äußere Atmosphäre unserer Erde treffen, eine wichtige Rolle spielen (siehe Anwendungen spezielle Relativitätstheorie  $\downarrow$  und auch die Feynman-Diagramme):

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \nu_e, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \nu_\mu.$$

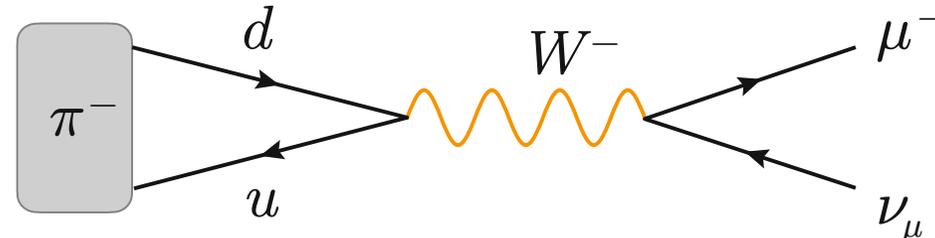
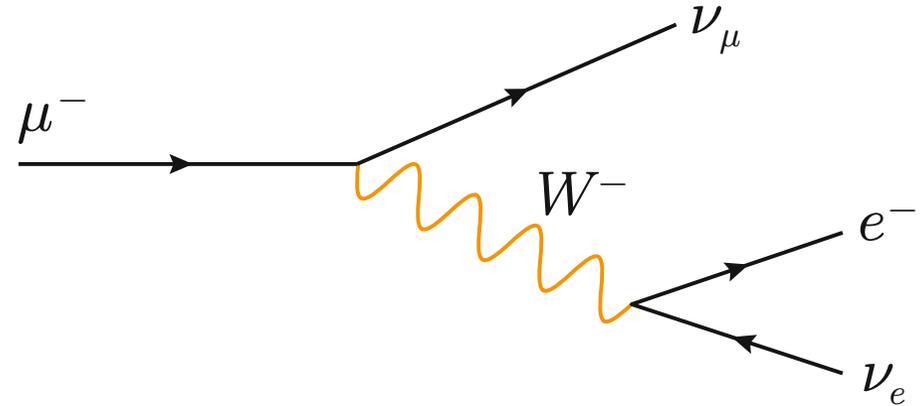
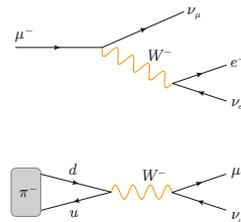
Wir sehen im ersten Fall, dass sich ein Myon in ein Myon-Neutrino umwandelt und ein  $W^-$ -Boson abstrahlt. Beim Pion annihiliert sich ein  $d$ -Quark mit einem  $u$ -Antiquark zu einem  $W^-$ -Boson. Da das  $W^-$ -Boson gela-

den ist, werden diese Reaktionen auch *geladene Ströme* genannt. Man beachte aber, dass die Myonmasse ( $105,6 \text{ MeV}/c^2$ ) und die Pionmasse ( $139,6 \text{ MeV}/c^2$ ) viel kleiner als die Masse des  $W^-$ -Bosons sind. Deswegen sind in beiden Fällen die  $W^-$ -Bosonen virtuell. Die Pärchen, in die jeweils das  $W^-$ -Boson zerfallen kann, sind zusammenfassend:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \\ u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \\ c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \\ t \\ b \end{pmatrix}$$

In der oberen Reihe stehen drei Lepton-Pärchen, unten drei Quark-Pärchen. Die Pärchen, die vertikal übereinander stehen, bilden jeweils eine Familie. Es gibt also drei Familien (Up und Down, rechts und links  $\downarrow$ ). Von links nach rechts gibt es drei Arten von Neutrinos, man nennt das auch drei *Flavours*. Ebenso gibt es drei geladene Lepton-Flavours ( $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$ ) und sechs Quark-Flavours ( $u$ ,  $c$ ,  $t$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $b$ ).

Feynman-Graphen für den Zerfall eines Myons (oben) und eines Pions (unten)



Über die Reichweite von Wechselwirkungen → S. 54  
 Produktion, Zerstörung und Zerfall von Teilchen → S. 50  
 Anwendungen der speziellen Relativitätstheorie → S. 88  
 Feynman-Diagramme → S. 48  
 Up, Down, Rechts und Links → S. 168

# Schwer aufteilbare Inhalte

168

7 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

## Up, Down, Rechts und Links

Wer ist mit wem verwandt?

Das Standardmodell enthält zwölf Fermionen. Das sind sechs Leptonen, das geladene Elektron ( $e^-$ ), Myon ( $\mu^-$ ) und Tauon ( $\tau^-$ ) mit ihren drei zugehörigen Neutrinos  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  und außerdem sechs Quark-Arten, sogenannte *Flavours*: Up, Down, Charm, Strange, Top und Bottom. Schematisch werden sie zu folgendem Muster zusammengefasst:

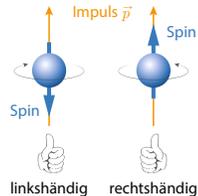
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L, e_R; \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L, \mu_R; \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L, \tau_R$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, u_R, d_R; \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, c_R, s_R; \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L, t_R, b_R$$

Die Pärchen mit Index  $L$ , z. B.  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$ , sind jeweils die Teilchen, die zusammen mit dem  $W$ -Boson und dem  $Z$ -Boson wechselwirken ( $\downarrow$ ). Die Teilchen mit Index  $R$  wechselwirken nicht mit dem  $W$ -Boson, wohl aber mit dem  $Z$ -Boson. Wir wollen in diesem Artikel die Bedeutung der Indices  $L$  und  $R$  klären, sowie den Zusammenhang mit der Struktur des Standardmodells.

Der Spin der Fermionen, z. B. der Elektronen, ist  $1/2$  und hat im Raum eine Ausrichtung ( $\downarrow$ ). Bezüglich des eigenen Impulsvektors  $\vec{p}$  kann er entweder parallel oder antiparallel ausgerichtet sein. Der dünne, orangefarbene Pfeil in der Abbildung zeigt die Impulsrichtung, der breite, blaue Pfeil die Spinrichtung. Ein Teilchen mit Spin in Richtung des Impulses heißt *rechtshändig*, mit entgegengesetztem Spin *linkshändig*. Man sagt: Ein rechtshändiges Elektron hat *Helizität*  $+1/2$ , also positiv, ein linkshändiges  $-1/2$ , also negativ.

Die Helizität wird durch die Richtung von Spin und Impuls eines Teilchens bestimmt.



Es gibt in der relativistischen Quantenmechanik noch eine andere Quantenzahl, genannt *Chiralität* (griechisch für „Händigkeit“). Sie ist leider nicht so anschaulich zu verstehen wie die He-

In der speziellen Relativitätstheorie ist die Impulsrichtung bezüglich des Spins nur für masselose Teilchen unabhängig vom Bezugssystem, weil diese immer mit Lichtgeschwindigkeit fliegen – und nichts ist schneller. Für massive Teilchen kann man immer ein schnelleres Bezugssystem in Impulsrichtung finden, so dass von diesem aus gesehen der Impuls  $\vec{p}$  seine Richtung umkehrt. Der Spin kehrt sich aber beim Wechsel zu einem schnelleren Bezugssystem *nicht* um.

Betrachten wir als Beispiel einen Beobachter am Boden, an dem ein kleines Propellerflugzeug vorbeifliegt. Der Propeller ist ein Kreisel und dreht sich, sagen wir, vom Piloten aus gesehen rechts herum, also im Uhrzeigersinn. Dann ist die Helizität positiv und der zugehörige Drehimpuls zeigt in Flugrichtung. Von einem viel schnelleren, großen Düsenflugzeug aus gesehen, bewegt sich das kleinere Flugzeug rückwärts, also ist der Impulsvektor umgekehrt. Der Propeller dreht sich aber für beide immer noch in die gleiche Richtung, somit sieht der Pilot im Düsenflugzeug eine negative Helizität. Insgesamt ist die Helizität also vom Bezugssystem abhängig und *nicht* eine inhärente Eigenschaft der Teilchen.



# Schwer aufteilbare Inhalte

172

7 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

## Spontane Symmetriebrechung im Standardmodell

Das Higgs-Boson als Spielverderber

Im Artikel zur spontanen Symmetriebrechung (↓) haben wir gesehen, wie Symmetrie spontan verschwinden kann: Kühlt man einen Permanentmagneten von hoher zu niedriger Temperatur ab, so wird die ursprüngliche Rotationssymmetrie um drei unabhängige Achsen zu einer Symmetrie um lediglich eine Achse reduziert. Diese Art, eine Symmetrie zu brechen und somit zu reduzieren, gibt es auch bei den Eichsymmetrien (↓) im Standardmodell. Hier ist der Anfangszustand mit hohen Temperaturen das sehr heiße Plasma aus Elementarteilchen im frühen Universum. Zu diesem Zeitpunkt war die Eichsymmetrie die sogenannte  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ , was der schwachen Wechselwirkung ( $SU(2)_L$ ) zusammen mit einer weiteren Wechselwirkung namens *Hyperladung* ( $U(1)_Y$ ) entspricht. Seit dem Urknall (↓) dehnt sich das Universum aus und kühlt sich dabei ab. Bei abfallender Temperatur verformt sich das Potential des Higgs-Bosons, so dass unterhalb einer Temperatur von etwa 246 GeV ( $3 \cdot 10^{15}$  Grad Celsius) die Symmetrie gebrochen ist, zu der kleineren Symmetrie  $U(1)_{EM}$  des Elektromagnetismus (↓). Insgesamt haben wir also

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow{\text{Temperatur ↓}} U(1)_{EM}$$

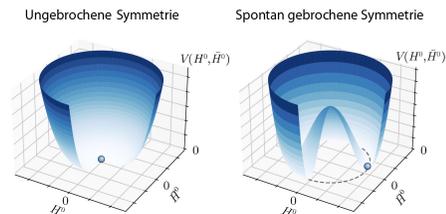
Wir schauen uns nun an, was genau mit den Higgs-Bosonen bei der Symmetriebrechung passiert.

Ähnlich wie z. B. die Leptonen formen die vier Higgs-Felder bei hohen Energien zwei  $SU(2)_L$ -Pärchen (Up, Down, Links, Rechts ↓)

$$\begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} H^- \\ H^0 \end{pmatrix},$$

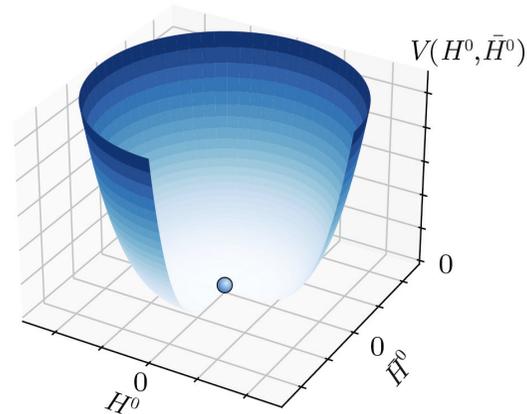
die jeweils an das  $W^-$ - und das  $W^+$ -Boson koppeln. Das zweite Pärchen enthält die Antiteilchen des ersten Pärchens. Das  $H^0$  hat die umgekehrte  $U(1)_Y$ -Hyperladung zum  $H^0$ . Mit den zwei Feldern  $H^0$  und  $\bar{H}^0$  ist eine potentielle Energie im System, bzw. ein Potential  $V_{\text{Higgs}}$ , verbunden, was wir schematisch dreidimensional in den beiden Bildern unten dargestellt haben. Die Achsen im flachen Bereich sind die Werte der Higgs-Felder  $H^0$  und  $\bar{H}^0$ , die vertikale Achse stellt die potentielle Energie im System dar. Je größer der Wert des Higgs-Feldes ist, desto höher ist die potentielle Energie, und zwar steigt sie mit der vierten Potenz der Werte des Higgs-Felds.

Auf dem linken Bild ist das Potential bei sehr hohen Temperaturen gezeigt, auf dem rechten Bild weit unterhalb von 246 GeV, z. B. bei Zimmertemperatur. Bei sehr hohen Temperaturen sieht das Potential wie eine Salatschüssel aus. Es ist rotationssymmetrisch um die vertikale Achse und das Minimum der Energie und das

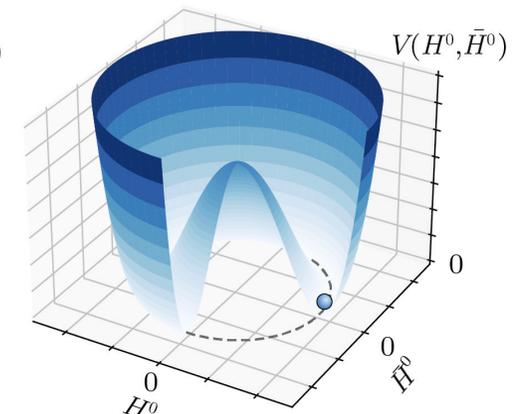


Higgs-Potential bei hohen (links) und niedrigen (rechts) Symmetrien

Ungebrochene Symmetrie



Spontan gebrochene Symmetrie



Spontane Symmetriebrechung → S. 58

Eichsymmetrien → S. 94

Urknall → S. 266

Elektromagnetismus → S. 164

↑ In Down Rechts und Links → S. 168

# Schwer aufteilbare Inhalte

172

7 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

## Spontane Symmetriebrechung im Standardmodell

Das Higgs-Boson als Spielverderber

Im Artikel zur spontanen Symmetriebrechung (↓) haben wir gesehen, wie Symmetrie spontan verschwinden kann: Kühlt man einen Permanentmagneten von hoher zu niedriger Temperatur ab, so wird die ursprüngliche Rotationssymmetrie um drei unabhängige Achsen zu einer Symmetrie um lediglich eine Achse reduziert. Diese Art, eine Symmetrie zu brechen und somit zu reduzieren, gibt es auch bei den Eichsymmetrien (↓) im Standardmodell. Hier ist der Anfangszustand mit hohen Temperaturen das sehr heiße Plasma aus Elementarteilchen im frühen Universum. Zu diesem Zeitpunkt war die Eichsymmetrie die sogenannte  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ , was der schwachen Wechselwirkung ( $SU(2)_L$ ) zusammen mit einer weiteren Wechselwirkung namens *Hyperladung* ( $U(1)_Y$ ) entspricht. Seit dem Urknall (↓) dehnt sich das Universum aus und kühlt sich dabei ab. Bei abfallender Temperatur verformt sich das Potential des Higgs-Bosons, so dass unterhalb einer Temperatur von etwa 246 GeV ( $3 \cdot 10^{15}$  Grad Celsius) die Symmetrie gebrochen ist, zu der kleineren Symmetrie  $U(1)_{EM}$  des Elektromagnetismus (↓). Insgesamt haben wir also

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow{\text{Temperatur ↓}} U(1)_{EM}$$

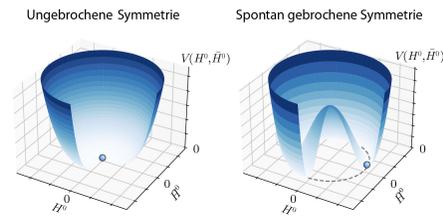
Wir schauen uns nun an, was genau mit den Higgs-Bosonen bei der Symmetriebrechung passiert.

Ähnlich wie z. B. die Leptonen formen die vier Higgs-Felder bei hohen Energien zwei  $SU(2)_L$ -Pärchen (Up, Down, Links, Rechts ↓)

$$\begin{pmatrix} H^+ \\ H^0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} H^- \\ H^0 \end{pmatrix},$$

die jeweils an das  $W^-$ - und das  $W^+$ -Boson koppeln. Das zweite Pärchen enthält die Antiteilchen des ersten Pärchens. Das  $H^0$  hat die umgekehrte  $U(1)_Y$ -Hyperladung zum  $H^0$ . Mit den zwei Feldern  $H^0$  und  $H^0$  ist eine potentielle Energie im System, bzw. ein Potential  $V_{\text{Higgs}}$ , verbunden, was wir schematisch dreidimensional in den beiden Bildern unten dargestellt haben. Die Achsen im flachen Bereich sind die Werte der Higgs-Felder  $H^0$  und  $H^0$ , die vertikale Achse stellt die potentielle Energie im System dar. Je größer der Wert des Higgs-Feldes ist, desto höher ist die potentielle Energie, und zwar steigt sie mit der vierten Potenz der Werte des Higgs-Felds.

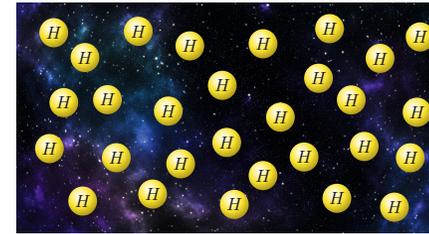
Auf dem linken Bild ist das Potential bei sehr hohen Temperaturen gezeigt, auf dem rechten Bild weit unterhalb von 246 GeV, z. B. bei Zimmertemperatur. Bei sehr hohen Temperaturen sieht das Potential wie eine Salatschüssel aus. Es ist rotationssymmetrisch um die vertikale Achse und das Minimum der Energie und das



Higgs-Potential bei hohen (links) und niedrigen (rechts) Symmetrien

Spontane Symmetriebrechung im Standardmodell

173



Das Universum ist gleichmäßig mit Higgs-Bosonen gefüllt.

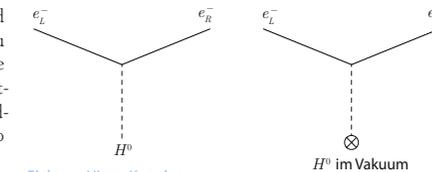
mit der bevorzugte Grundzustand des Systems liegt am Ursprung, am Boden der Salatschüssel. Dort befindet sich dann energetisch auch das ganze Higgs-System, hier als kleine blaue Kugel gezeigt. An diesem Punkt sind die Grundzustände der beiden Felder  $H^0$  und  $H^0$  null, sie verschwinden also. Zu diesem Zeitpunkt im heißen frühen Universum werden die Higgs-Felder in Reaktionen erzeugt und vernichtet, so wie auch z. B. top-Quarks, aber es gibt keinen konstanten Hintergrund von Higgs-Teilchen und somit hat auch kein Elementarteilchen eine von null verschiedene Masse.

Wenn die Temperatur abfällt, verformt sich das Potential, wie auf der rechten Seite gezeigt. Am Ursprung bildet sich eine Beule aus, die von einer Rinne umgeben ist. Die Schüssel ist immer noch rotationssymmetrisch, aber das Minimum ist nicht mehr am Ursprung, sondern befindet sich in der Rinne, in einem Abstand zum Ursprung. Deshalb verschiebt sich das System zu einem Punkt in der Rinne. Alle Punkte in der Rinne sind energetisch gleichberechtigt (Rotationssymmetrie). Das System muss jedoch einen Punkt als Grundzustand auswählen – die blaue Kugel muss irgendwo hin – hier gezeigt entlang der  $H^0$ -Richtung.

In diesem Zustand hat das  $H^0$ -Feld einen konstanten Wert, den Vakuumerwartungswert  $\langle H^0 \rangle = 246$  GeV. Dies bedeutet, dass das ganze Universum gleichmäßig mit einem Hintergrund von Higgs-Teilchen erfüllt ist. An diesen Higgs-Teilchen streuen notwendigerweise die anderen Teilchen, z. B. das Elektron, und erhalten so ihre Masse. Der Feynman-Vertex für die Elektron-Higgs-Kopplung ist im unteren Bild links gezeigt: Ein rechtshändiges Elektron  $e_R^-$  koppelt zusammen mit einem linkshändigen Elektron  $e_L^-$  an das Higgs-Boson.

An diesem Vertex müssen wie immer alle Quantenzahlen erhalten sein. So wandelt sich links ein  $e_L^-$ , welches Teil eines  $SU(2)_L$ -Pärchens ist, in ein  $e_R^-$  um, was *nicht* Teil eines solchen Pärchens ist. Das ist in Ordnung, da die beiden an das  $H^0$  koppeln, was auch Teil eines Pärchens ist. Die Pärchenzahl ist sozusagen erhalten.

Wenn ein Elektron mit einem Hintergrund-Higgs-Boson im Vakuum wechselwirkt, dann sehen wir den Higgs-Teil der Reaktion nicht. Das ist im rechten Bild mit dem  $\otimes$  bei dem Higgs-Boson gezeigt. Für uns sieht es so aus, also ob sich ein  $e_L^-$  einfach in ein  $e_R^-$  umwandelt. Die Pärchenzahl ist verletzt, die zugehörige Quantenzahl ist *nicht* mehr erhalten. Die Symmetrie ist spontan gebrochen! Wie wir sehen, ist in allen Reaktionen die elektrische Ladung nach wie vor erhalten. Dies ist die übriggebliebene Symmetrie  $U(1)_{EM}$ .



Elektron-Higgs-Kopplung

Spontane Symmetriebrechung → S. 58

Eichsymmetrien → S. 94

Urknall → S. 266

Elektromagnetismus → S. 164

Up, Down, Rechts und Links → S. 168



# Schwer aufteilbare Inhalte

## Spontane Symmetriebrechung

### Die versteckte Symmetrie

Symmetrien (↓) spielen in der Teilchenphysik eine zentrale Rolle. Sie erlauben uns häufig, Ordnung in scheinbares Chaos zu bringen und führen zu Erhaltungsgrößen (Noether-Theorem ↓). Außerdem beruht das Konstruktionsprinzip des gesamten Standardmodells auf der Existenz bestimmter Symmetrien.

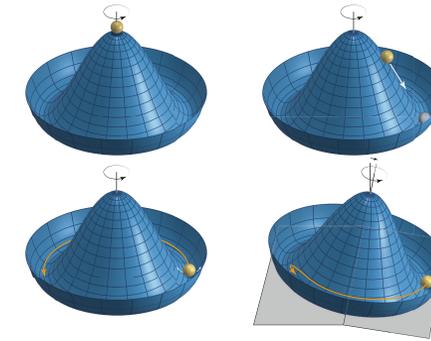
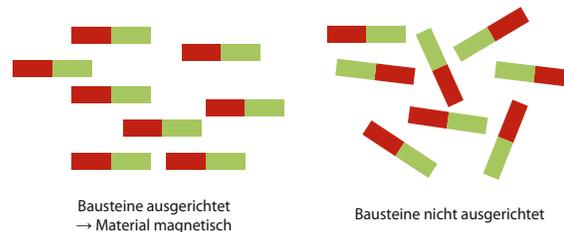
Typischerweise hat eine Symmetrie einen direkten Einfluss auf die Physik. So ist z. B. das Proton, das aus zwei up-Quarks und einem down-Quark besteht, fast genauso schwer wie das Neutron, bestehend aus zwei down-Quarks und einem up. Der Grund hierfür ist, dass die starke Wechselwirkung nicht zwischen Quarktypen unterscheidet. In anderen Worten: Die starke Wechselwirkung ist symmetrisch unter Vertauschung der Quarks. Der sehr kleine, aber wichtige Massenunterschied kommt aus Quarkeigenschaften, nicht aus der starken Wechselwirkung (Quarkmasseneffekt ↓).

Aber es gibt auch versteckte Symmetrien. Diese liegen vor, wenn die Wechselwirkung zwar eine Symmetrie hat, diese jedoch dynamisch bzw. spontan gebrochen ist. Was das bedeutet, soll im Folgenden erklärt werden. Ein Beispiel einer solchen versteckten Symmetrie kennen wir alle: den Permanentmagneten. Man kann sich diesen wie eine Ansammlung vieler, winzig kleiner Magnete vorstellen. Das Material ist magnetisch, wenn alle diese kleinen Magnete in gleicher Richtung ausgerichtet sind. Dieser Zustand ist in der

linken Hälfte der Abbildung dargestellt. Erhitzt man den Magneten und erhöht damit die Bewegungsenergie der kleinen Magnete, so geht die Ausrichtung verloren. Das Material ist dann nicht mehr magnetisch und insbesondere zeichnet es keine Richtung mehr aus. Es ist symmetrisch. Kühlt es dann jedoch wieder ab, dann wird ab einer bestimmten Temperatur plötzlich das Material wieder magnetisch, wodurch dann wieder eine Raumrichtung ausgezeichnet wird – welche dies jedoch ist, kann man nicht vorhersagen. Die Symmetrie wird spontan gebrochen.

Dieses Phänomen ist also dadurch charakterisiert, dass die Wechselwirkung im Material zwar symmetrisch ist (es gibt a priori keine Vorzugsrichtung), aber trotzdem wird bei Abkühlung spontan eine Richtung ausgezeichnet. Oder allgemeiner: Obwohl das Material keine Vorzugsrichtung vorgibt und somit sehr symmetrisch ist, zeichnet der Grundzustand eine Richtung aus und ist somit weniger symmetrisch. Die wohl

Permanenmagnet bei Raumtemperatur (links) und erhitzt (rechts)



Das Sombbrero-Potential

klarste Illustration dieses Effekts ist das sogenannte *Sombbrero-Potential*, das in der Abbildung dargestellt ist. Man stelle sich also einen typischen Mexikanerhut vor, der symmetrisch unter Drehungen um die zentrale Achse ist, wie in der Abbildung oben links dargestellt. Das gilt auch dann noch, wenn man auf die Spitze eine Kugel legt. Allerdings wird die Kugel nicht lange auf der Spitze bleiben, sondern in irgendeine Richtung herunterrollen, um dann in der Hutkrempe liegenzubleiben. Ist das geschehen, so ist das System als Ganzes nicht mehr unter Drehungen symmetrisch. Die Symmetrie ist spontan gebrochen, obwohl der Hut alleine natürlich seine Symmetrie behält.

Wie in dem unteren linken Bild der Abbildung angedeutet, kostet es nun keine Energie, die Kugel in der Krempe zu bewegen, wohl aber, wenn man sie nach außen oder innen schieben möchte. Also ist nun die Physik für diese beiden Aktionen sehr unterschiedlich. Und das bleibt auch dann noch so, wenn der Hut leicht

geneigt ist, was einer kleinen expliziten Brechung der Symmetrie entspricht. Das Bild zeigt: Solange diese Brechung nicht zu groß ist, bestimmt die spontane Symmetriebrechung die Dynamik des Systems.

In der Teilchenphysik steckt eine spontane Symmetriebrechung hinter dem Higgs- und dem Peccei-Quinn-Mechanismus (↓), denen in diesem Buch je ein eigener Artikel gewidmet ist. Ein Beispiel für ein System, das von einer spontanen Symmetriebrechung kontrolliert wird, obwohl die Symmetrie auch explizit gebrochen ist (leicht gekippter Hut), ist die Phänomenologie der starken Wechselwirkung bei kleinen Energien. Dabei ist die Symmetrie spontan gebrochen, die sich einstellen würde, wenn die drei leichtesten Quarks (up, down und strange) eine verschwindende Masse hätten. Der Effekt der spontanen Symmetriebrechung wäre dann, dass die Pionen, Kaonen und das  $\eta$ -Meson, die aus den leichten Quarks bestehen und die wir im Artikel zum Quarkmodell (↓) näher kennenlernen werden, ebenfalls fast keine Masse hätten. (Das ist die quantenfeldtheoretische Analogie dazu, dass es keine Energie kostet, die Kugel entlang der Krempe des Sombberos zu bewegen.) Nun sind up-, down- und strange-Quark aber nicht masselos, sondern haben nicht-verschwindende Massen (↓) – die von up- und down-Quark sind sehr klein, die des strange-Quarks 20-mal größer. Diese nicht-verschwindenden Massen sorgen dafür, dass der „Hut“ der starken Wechselwirkung zwar geneigt ist, aber nur sehr leicht. Entsprechend sind Pionen zwar nicht masselos, aber haben eine sehr viel kleinere Masse als alle anderen Teilchen, die an der starken Wechselwirkung teilnehmen. Kaonen und das  $\eta$ -Meson, die auch strange-Quarks enthalten, sind zwar schwerer, aber immer noch sehr viel leichter als alle anderen Teilchen mit strange-Quarks.

# Schwer aufteilbare Inhalte

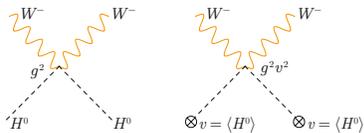
174

7 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik

## Spontane Symmetriebrechung II

Woher kommt das Photon?

Wie im vorherigen Artikel (1) beschrieben, hat das Standardmodell im frühen Universum bei Temperaturen über 246 GeV ( $3 \cdot 10^{15}$  Grad Celsius) die Eichsymmetrie  $SU(2)_L \times U(1)_Y$ . Zu der  $SU(2)_L$ -Eichsymmetrie gehören drei Eichbosonen: die geladenen  $W$ -Bosonen:  $W^\pm$ , und ein neutrales  $W$ -Boson:  $W^0$ . Zu der  $U(1)_Y$ -Eichsymmetrie, auch *Hyperladung* genannt, gehört ein elektrisch neutrales Eichboson, welches mit  $B^0$  bezeichnet wird. Die Symmetrie sagt vorher, wie die Eichbosonen an das Higgs-Boson koppeln. Beispielsweise koppeln zwei geladene  $W$ -Bosonen an zwei neutrale Higgs-Bosonen, wie links in der Abbildung gezeigt.



Kopplung der geladenen  $W$ -Bosonen an Higgs-Bosonen

Als die Temperatur im frühen Universum unter 246 GeV absank, wurde die Symmetrie spontan gebrochen. Dadurch besitzt das Higgs-Boson einen Vakuumerwartungswert,  $v = \langle H^0 \rangle$ , was in der rechten Abbildung als  $\otimes$  gezeigt ist. Dies führt zu neuen Wechselwirkungen: Die  $W$ -Bosonen streuen an dem Hintergrund von Higgs-Bosonen, wie im vorherigen Artikel die Elektronen. Die Higgs-Bosonen selbst sehen wir nicht, wir haben eine reine  $W$ - $W$ -Kopplung. Genau dadurch erhält das  $W^\pm$ -Boson eine Masse. Das ist der Higgs-Mechanismus: Durch spontane Symmetriebrechung

streuung streuen die Eichbosonen am Higgs-Hintergrund und erhalten eine Masse.

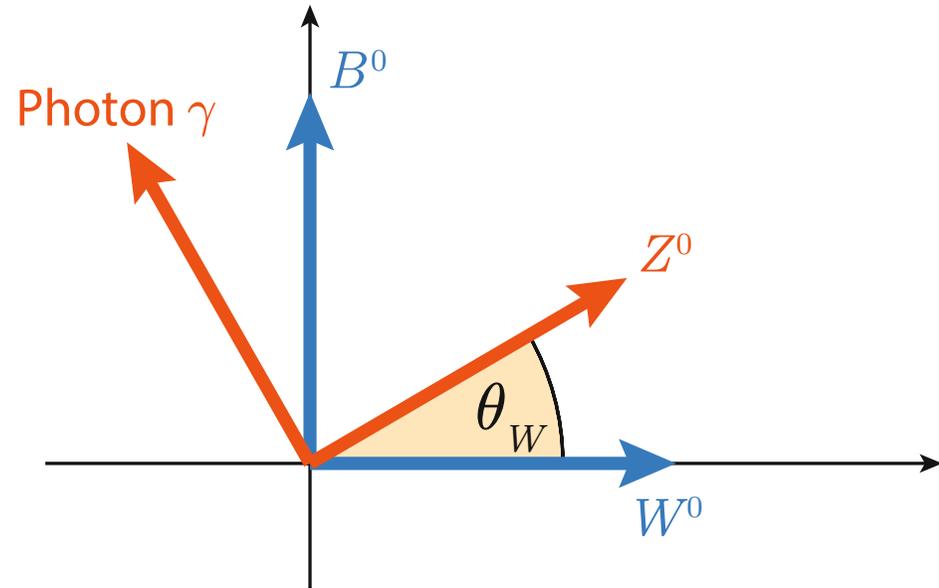
Der Feynman-Graph links in der Abbildung ist proportional der  $SU(2)_L$ -Eichkopplung zum Quadrat:  $g^2$ . Der Graph rechts in der Abbildung ist dann proportional zu  $g^2 v^2$ . Der Higgs-Mechanismus im Standardmodell sagt also vorher, dass die  $W^\pm$ -Bosonmasse durch  $M_W^2 = \frac{1}{2} g^2 v^2$  gegeben ist.

Jetzt schauen wir uns das analog für die neutralen Eichbosonen an, wo es etwas komplizierter wird. Es führt uns aber zu den etwas ungewöhnlichen Eigenschaften des  $Z$ -Bosons und zum masselosen Photon des Elektromagnetismus.

Aufgrund der  $SU(2)_L$ -Eichsymmetrie gibt es ein drittes Eichboson, das  $W^0$ . Dieses koppelt an die Higgs-Bosonen wie oben links in der Abbildung oben auf der nächsten Seite gezeigt: Zwei  $W^0$  wechselwirken mit zwei  $H^0$ . Das Diagramm ist auch proportional zu  $g^2$ , ähnlich wie das  $W^\pm$  in der vorherigen Abbildung.

Das Eichboson der  $U(1)_Y$  Hyperladung,  $B^0$ , koppelt ebenso an das Higgs-Boson, wie oben rechts in der Abbildung gezeigt: Zwei  $B^0$  koppeln an zwei  $H^0$ , wie bei den  $W^0$ . Allerdings ist dieses Diagramm proportional zu  $g'^2$ , wobei  $g'$  die Kopplungskonstante der Hyperladungswechselwirkung  $U(1)_Y$  ist.

Nun gibt es bei den neutralen Eichbosonen eine weitere Kopplung, unten in der Mitte der Abbildung gezeigt.



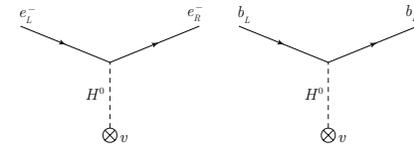
# Schwer aufteilbare Inhalte

## Spontane Symmetriebrechung III

Was hat die bottom-Quark-Masse mit dem Higgs-Zerfall zu tun?

Im Standardmodell koppeln die Fermionen wie beispielsweise das Elektron oder das bottom-Quark direkt an das Higgs-Boson, wie in der Abbildung unten gezeigt. Dabei wechselwirkt immer ein links- und ein rechtshändiges Fermion mit dem Higgs-Boson (4). Die Kopplungsstärke wird für das Elektron mit  $h_e$  und für das bottom-Quark mit  $h_b$  bezeichnet, analog für die anderen Fermionen – außer den Neutrinos. Da es kein rechtshändiges Neutrino im Standardmodell gibt, koppeln die Neutrinos *nicht* an das Higgs-Boson und sind deshalb im Standardmodell masselos (4). Die Kopplungsparameter  $h_e, h_b, \dots$  sind im Standardmodell freie Parameter, d. h. sie sind zunächst unbestimmt.

Bei hohen Temperaturen im frühen Universum, oberhalb von 246 GeV, sitzt das Higgs-Feld am Minimum des Potentials am Ursprung (4) und hat keinen Vakuumerwartungswert. In dieser Phase ist das Elektron masselos, da es nur mit den freien Higgs-Bosonen wechselwirken kann. Wenn die Temperatur im Universum deutlich unter 246 GeV fällt, verformt sich das Higgs-Potential und das Higgs-Boson bekommt einen Vakuumerwartungswert von  $v = 246$  GeV. Es gibt dann einen Hintergrund an Higgs-Bosonen, an denen Elektronen und bottom-Quarks streuen können. Das



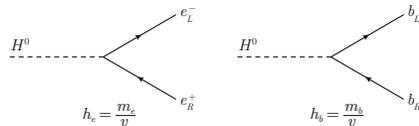
Kopplung von Elektron und bottom-Quark an das Higgs-Boson mit Vakuumerwartungswert

ist in der Abbildung mit einem  $\otimes$  gezeigt, zusammen mit einem  $v$ , für den Vakuumerwartungswert. Dieser Hintergrund an Higgs-Bosonen ist überall identisch (homogen) und unabhängig von der Richtung (isotrop). Das Elektron erhält durch die Streuung an diesem universellen Hintergrund eine universelle Eigenschaft: die *Elektronmasse*. Genauso ist es auch für die anderen Fermionen:  $\mu, \tau$  und  $u, d, s, c, b, t$ .

Dieser Higgs-Mechanismus bestimmt die Masse durch die Kopplung an das Higgs-Feld multipliziert mit dem Wert  $v$ :

$$m_e = h_e \cdot v, \quad m_b = h_b \cdot v.$$

Das gilt analog auch für die anderen Fermionen außer den Neutrinos. Alle Teilchen im Standardmodell erhalten durch den Higgs-Mechanismus ihre Masse: die Leptonen und Quarks, aber auch das  $W$ - und das  $Z$ -Boson. Das Photon und das Gluon bleiben verschont, weil das Higgs-Feld eine verschwindende elektrische Ladung und Farbladung hat (4). Das ist der *Ursprung* der Masse der Elementarteilchen. Unsere eigene Masse kommt aber vorrangig von der Masse der Protonen



Kopplung von Elektron und bottom-Quark an das Higgs-Boson

Wahrscheinlichkeit:

- $H^0 \rightarrow bb$  = 57,7 %
- $H^0 \rightarrow \tau^- \tau^+$  = 6,3 %
- $H^0 \rightarrow cc$  = 3,2 %
- $H^0 \rightarrow \mu^- \mu^+$  = 0,02 %
- $H^0 \rightarrow e^- e^+$  =  $5 \cdot 10^{-9}$
- $H^0 \rightarrow \gamma \gamma$  = 0,04 %
- $H^0 \rightarrow W^+ (W^-)$  = 21,7 %
- $H^0 \rightarrow Z^0 (Z^0)$  = 2,6 %

Up, Down, Rechts und Links → S. 168  
 Neutrinomassen → S. 256  
 Spontane Symmetriebrechung im Standardmodell → S. 172  
 Spontane Symmetriebrechung II → S. 174

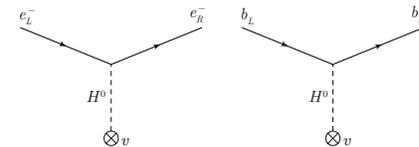
# Schwer aufteilbare Inhalte

## Spontane Symmetriebrechung III

Was hat die bottom-Quark-Masse mit dem Higgs-Zerfall zu tun?

Im Standardmodell koppeln die Fermionen wie beispielsweise das Elektron oder das bottom-Quark direkt an das Higgs-Boson, wie in der Abbildung unten gezeigt. Dabei wechselwirkt immer ein links- und ein rechtshändiges Fermion mit dem Higgs-Boson (↓). Die Kopplungsstärke wird für das Elektron mit  $h_e$  und für das bottom-Quark mit  $h_b$  bezeichnet, analog für die anderen Fermionen – außer den Neutrinos. Da es kein rechtshändiges Neutrino im Standardmodell gibt, koppeln die Neutrinos *nicht* an das Higgs-Boson und sind deshalb im Standardmodell masselos (↓). Die Kopplungsparameter  $h_e, h_b, \dots$  sind im Standardmodell freie Parameter, d. h. sie sind zunächst unbestimmt.

Bei hohen Temperaturen im frühen Universum, oberhalb von 246 GeV, sitzt das Higgs-Feld am Minimum des Potentials am Ursprung (↓) und hat keinen Vakuumerwartungswert. In dieser Phase ist das Elektron masselos, da es nur mit den freien Higgs-Bosonen wechselwirken kann. Wenn die Temperatur im Universum deutlich unter 246 GeV fällt, verformt sich das Higgs-Potential und das Higgs-Boson bekommt einen Vakuumerwartungswert von  $v = 246$  GeV. Es gibt dann einen Hintergrund an Higgs-Bosonen, an denen Elektronen und bottom-Quarks streuen können. Das



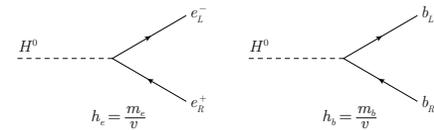
Kopplung von Elektron und bottom-Quark an das Higgs-Boson mit Vakuumerwartungswert

ist in der Abbildung mit einem  $\otimes$  gezeigt, zusammen mit einem  $v$ , für den Vakuumerwartungswert. Dieser Hintergrund an Higgs-Bosonen ist überall identisch (homogen) und unabhängig von der Richtung (isotrop). Das Elektron erhält durch die Streuung an diesem universellen Hintergrund eine universelle Eigenschaft: die *Elektronenmasse*. Genauso ist es auch für die anderen Fermionen:  $\mu, \tau$  und  $u, d, s, c, b, t$ .

Dieser Higgs-Mechanismus bestimmt die Masse durch die Kopplung an das Higgs-Feld multipliziert mit dem Wert  $v$ :

$$m_e = h_e \cdot v, \quad m_b = h_b \cdot v.$$

Das gilt analog auch für die anderen Fermionen außer den Neutrinos. Alle Teilchen im Standardmodell erhalten durch den Higgs-Mechanismus ihre Masse: die Leptonen und Quarks, aber auch das  $W$ - und das  $Z$ -Boson. Das Photon und das Gluon bleiben verschont, weil das Higgs-Feld eine verschwindende elektrische Ladung und Farbladung hat (↓). Das ist der *Ursprung* der Masse der Elementarteilchen. Unsere eigene Masse kommt aber vorrangig von der Masse der Protonen



Kopplung von Elektron und bottom-Quark an das Higgs-Boson

und Neutronen in unserem Körper, die ihren Ursprung in der starken Wechselwirkung hat (↓). Die Elektronen tragen weniger als 0,1% zu der Atommasse bei: Masse(Elektron)/Masse(Proton) = 0,054%. Interessanterweise hängt der Atomradius, also die Größe aller Atome, direkt von der Elektronenmasse ab, und zwar umgekehrt proportional. Würde das Elektron doppelt so stark an das Higgs-Boson koppeln, wäre es doppelt so schwer, aber alle Atome wären nur halb so groß.

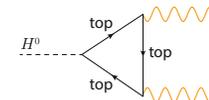
Die Massen der Fermionen wurden experimentell sehr genau vermessen. Wir können die obigen Gleichungen umdrehen und für das Elektron und das bottom-Quark schreiben:

$$h_e = \frac{m_e}{v}, \quad h_b = \frac{m_b}{v}.$$

Das heißt, durch die Massenmessung bestimmen wir die Higgs-Kopplungsparameter. Im Higgs-Mechanismus koppelt das Higgs-Boson (↓) an die Fermionen proportional zur Fermionmasse! Insbesondere ist die Kopplung an bottom-Quarks um den Faktor  $m_b/m_e = 8.000$  größer! Auch die Eichbosonen  $W^\pm$  und  $Z^0$  koppeln proportional zu ihrer Masse an das Higgs-Boson.

Am LHC sind schon sehr viele Higgs-Bosonen produziert worden (↓). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Higgs-Boson in ein bestimmtes Fermionpaar zerfällt, ist direkt proportional zum Quadrat der Kopplung, man muss ja den mathematischen Ausdruck vom Feynman-Diagramm (↓) quadrieren. Dann erhält man die folgenden Zerfallswahrscheinlichkeiten:

Der Zerfall eines Higgs-Bosons in zwei Photonen über virtuelle top-Quarks

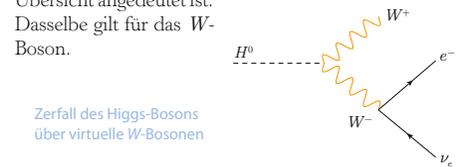


Wahrscheinlichkeit:	}	$H^0 \rightarrow b\bar{b}$	= 57,7%
		$H^0 \rightarrow \tau^-\tau^+$	= 6,3%
		$H^0 \rightarrow c\bar{c}$	= 3,2%
		$H^0 \rightarrow \mu^-\mu^+$	= 0,02%
		$H^0 \rightarrow e^-e^+$	= $5 \cdot 10^{-9}$
		$H^0 \rightarrow \gamma\gamma$	= 0,04%
		$H^0 \rightarrow W^+(W^-)$	= 21,7%
$H^0 \rightarrow Z^0(Z^0)$	= 2,6%		

Der Zerfall in bottom-Quarks ist 100 Millionen Mal häufiger als in Elektronen, da das bottom-Quark sehr viel schwerer als das Elektron ist. Die blau markierten Zerfälle wurden schon mit der vorhergesagten Häufigkeit beobachtet, im Rahmen der experimentellen Fehler.

Zuerst wurde das Higgs-Boson über den relativ seltenen Zerfall in zwei Photonen beobachtet. Das zugehörige Feynman-Diagramm ist links gezeigt, mit virtuellen top-Quarks als Zwischenzustand. Die Beobachtung der Photonen war experimentell viel leichter als die der bottom-Quarks.

Das Higgs-Boson kann nicht direkt in zwei  $Z$ -Bosonen zerfallen, da diese zusammen schwerer als das Higgs-Boson sind. Ein  $Z$ -Boson als Zerfallsprodukt muss deshalb virtuell sein (Reichweite ↓), was mit dem \* in der Übersicht angedeutet ist. Dasselbe gilt für das  $W$ -Boson.



Zerfall des Higgs-Bosons über virtuelle W-Bosonen

Up, Down, Rechts und Links → S. 168  
 Neutrinomassen → S. 256  
 Spontane Symmetriebrechung im Standardmodell → S. 172  
 Spontane Symmetriebrechung II → S. 174

Woher kommt unsere Masse? → S. 204  
 Higgs-Boson: Ist es wirklich das Higgs-Boson? → S. 232  
 Die Entdeckung des Higgs-Bosons → S. 230  
 Feynman-Diagramme → S. 48



# Schwer aufteilbare Inhalte

232

9 Der Triumph des Standardmodells und darüber hinaus

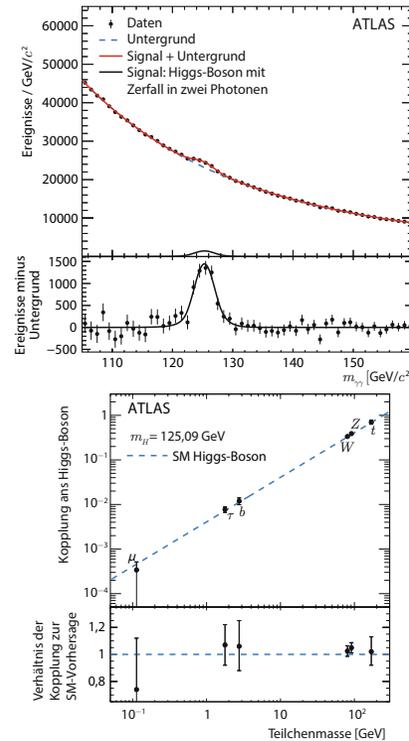
## Ist es wirklich das Higgs-Boson?

Experimentelles Portrait eines Teilchens

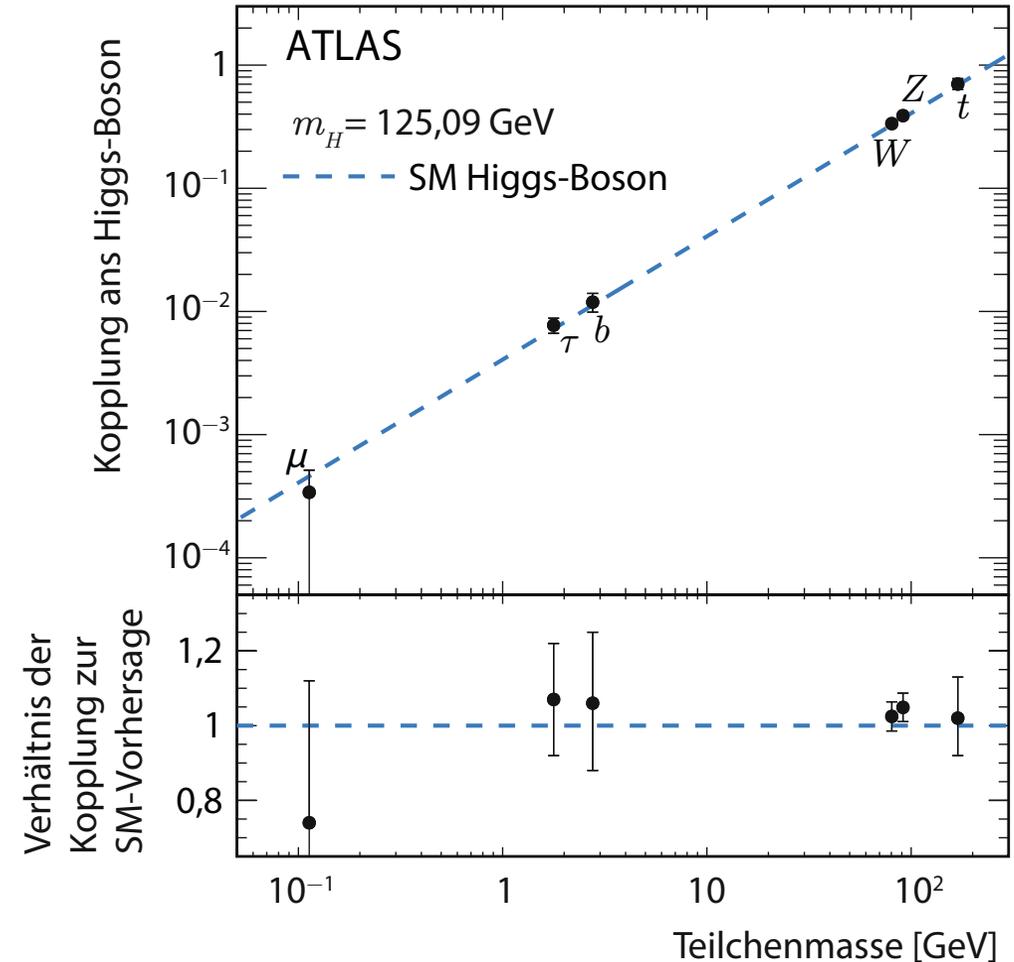
Das letzte fehlende Teilchen des Standardmodells wurde mit der Entdeckung des Higgs-Bosons ( $\downarrow$ ) im Jahr 2012 gefunden. Wäre die Geschichte der Teilchenphysik nur die Entdeckung neuer fundamentaler Teilchen, dann wären die Teilchenphysikerinnen und -physiker seither – jedenfalls bis zur Drucklegung dieses Textes – nicht sehr erfolgreich gewesen. Aber die Geschichte der Teilchenphysik ist hauptsächlich das genaue Messen – und das Verbessern des theoretischen Verständnisses – der *Eigenschaften* der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen.

Das kann viel langwierige und detaillierte Arbeit bedeuten. Das Higgs-Boson und der experimentelle Stand seines Verständnisses bis zum Beginn des Jahres 2022 – also in etwa bis zum zehnjährigen Jubiläum seiner Entdeckung – soll hier als Beispiel dienen. Denn bei der Entdeckung war eine wichtige Frage offen geblieben: Was wurde da eigentlich entdeckt? Das Higgs-Boson des Standardmodells? Oder *ein* Higgs-Boson eines erweiterten Modells (Supersymmetrie  $\downarrow$ )? Oder etwas ganz anderes, was zufällig auf den ersten Blick so aussah wie ein Higgs-Boson?

Wenn zum Zeitpunkt seiner Entdeckung das entdeckte Signal auch noch etwas kümmerlich auszusehen schien: In den Daten bis zum Jahr 2018 hatte sich das definitiv geändert. Dass bei einer Masse von  $125,1 \text{ GeV}/c^2$  zum Beispiel im Zerfall des neuen Teilchens in zwei Photonen ein Signal ist, kann niemand leugnen. Aber nicht nur in diesem Zerfallskanal wurden alle möglichen Eigenschaften wie Winkelverteilungen und Energien von



Die Massen der Teilchen stimmen genau mit der Erwartung aus ihren gemessenen Kopplungen ans Higgs-Boson überein.



Die Entdeckung des Higgs-Bosons → S. 230  
 Supersymmetrie → S. 260  
 Teilchenmassen: Spontane Symmetriebrechung III → S. 176  
 Spin → S. 44

# Andere Beispiele und Visualisierungen



# Methoden sind wichtig

80

3 Experimentelle Grundlagen

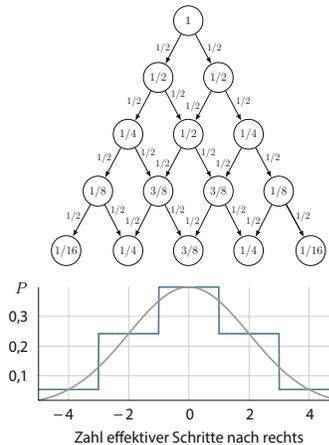
## Statistik

### Die mathematische Beschreibung von Zufall

Teilchenphysik hat aus mehreren Gründen immer mit Zufall zu tun: Einerseits sind quantenmechanische Vorgänge (1) in der Natur offenbar fundamental vom Zufall geleitet. Zum anderen sind viele Unsicherheiten (1), die bei quantitativen Vorhersagen und beim Experimentieren auftreten, durch zufällige Prozesse beschreibbar. Unsicherheiten gibt es bei der Betrachtung der Welt durch Beobachtung immer: Kein Messinstrument misst immer exakt dasselbe, wenn man die Messung wiederholt, und bei keinem stimmt die Kalibration genau. Die mathematische Beschreibung von mit Zufälligkeit behafteten Vorgängen ist die Statistik.

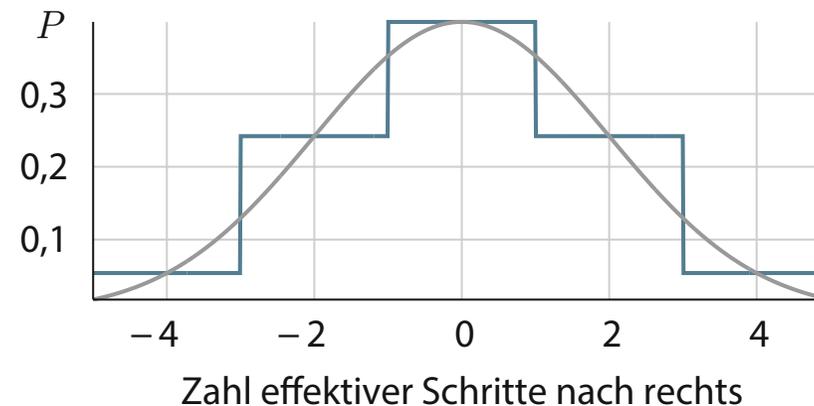
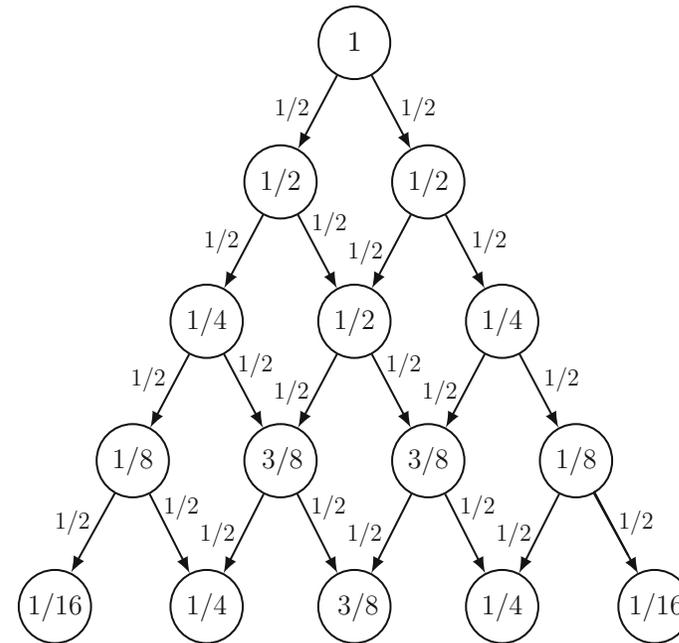
Ein Charakteristikum von Zufall ist, dass sich der *exakte* Wert der nächsten Zufallszahl – also z. B. den Lottowahlen oder dem Messwert bei der nächsten Messung – nicht vorhersagen lässt. Daraus folgt aber nicht, dass die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über den Zufall nichts wissen. Die Prozesse, die zu den mit zufälligen Unsicherheiten behafteten Ergebnissen führen sind zwar zufällig, aber nicht beliebig. Sie folgen im Allgemeinen den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitsrechnung, so dass über die Wahrscheinlichkeit, ein bestimmtes Ergebnis zu erhalten, durchaus eine definitive Aussage getroffen werden kann. Auf diesem Prinzip basieren fast alle fundamentalen Messungen.

Mit Wahrscheinlichkeiten kann man rechnen. Ein einfaches Beispiel ist der Münzwurf: Kopf oder Zahl haben bei einer perfekten Münze je eine Wahrscheinlichkeit von 50%. Die Wahrscheinlichkeiten aller Möglichkeiten müssen sich immer zu 100% addieren, denn



Das Galton-Brett und die Gaußverteilung

genau einen Ausgang gibt es bei genau einem Experiment schließlich immer. Wenn also Kopf und Zahl gleich wahrscheinlich sind, weil die Münze symmetrisch ist, dann ist die jeweilige Wahrscheinlichkeit  $1/2 = 50\% = 0,5$ . Für zwei Münzwürfe hintereinander folgt daraus, dass die Wahrscheinlichkeit für zwei mal Kopf  $50\% \cdot 50\% = 25\%$  ist. Etwas weniger intuitiv ist, dass die Wahrscheinlichkeit für einmal Kopf und einmal Zahl nicht 25%, sondern  $25\% + 25\% = 50\%$  ist, denn es gibt zwei Möglichkeiten, dieses Ergebnis zu erreichen: Entweder der erste *oder* der zweite Wurf



Grundkonzepte der Quantenmechanik → S. 40

Messunsicherheiten → S. 82, Die Bestimmung von Messunsicherheiten → S. 146

# Methoden sind wichtig

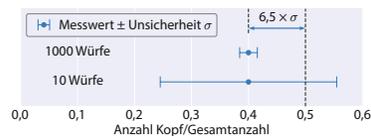
Messunsicherheiten

83



ern misst und das Ergebnis durch zehn teilt. Genauer wird darauf im Artikel zur Bestimmung von Messunsicherheiten (↓) eingegangen.

Als konkretes Beispiel für die Reduzierung des statistischen Fehlers durch Wiederholen des Experiments betrachten wir das Werfen einer Münze. Um zu überprüfen, ob mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils  $1/2$  eine der beiden Seiten oben liegt, können Sie diese z. B. zehnmal werfen. Fällt viermal Kopf und sechsmal Zahl, ist dies sicherlich nicht ausreichend, um eine Aussage zu treffen, ob die Münze gezinkt ist. Treten jedoch bei 1000-maligem Werfen 400-mal Kopf und 600-mal Zahl auf, ist der statistische Fehler  $\sigma = 0,015$  (siehe Informationskasten). Die Differenz zwischen dem Messwert von 0,4 und der Hypothese 0,5 beträgt daher  $0,1 = 6,5 \sigma$ . Man spricht von einem  $6,5\sigma$ -Effekt. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Effekt zufällig auftritt, liegt bei etwa  $10^{-10}$ . Somit können wir praktisch ausschließen, dass bei der Münze beide Seiten mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1/2$  auftreten.



## Binomialverteilung beim Münzwurf und Wahlumfragen

Wenn bei  $N$  Münzwürfen  $k$  mal das Ergebnis „Kopf“ fällt, kann man die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis „Kopf“ durch  $k/N$  und die Messunsicherheit auf dieses Verhältnis durch

$$\sigma = \sqrt{\frac{k}{N} \left(1 - \frac{k}{N}\right)}$$

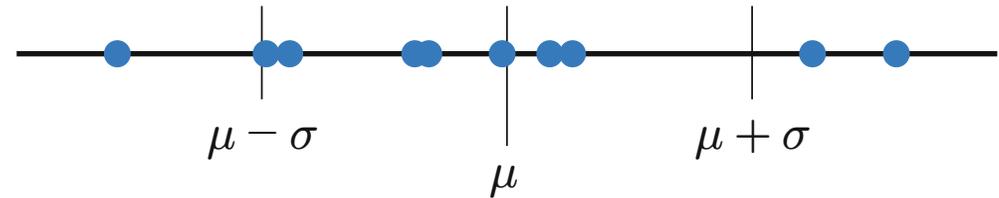
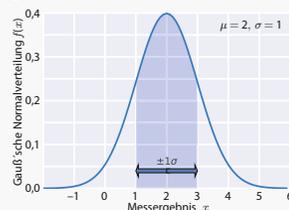
abschätzen. Entsprechend kann bei der Befragung von  $N$  Personen, bei der  $k$  mal für die Partei  $A$  gestimmt wurde, deren Stimmenanteil mit  $k/N$  und die Unsicherheit mit obiger Formel abgeschätzt werden.

## Gauß'sche Normalverteilung

Messergebnisse  $x$  sind oft nach einer Gauß'schen Normalverteilung

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

verteilt. In den Bereich einer Standardabweichung  $\sigma$  um den Mittelwert  $\mu$ , der dem wahren unbekanntem Wert der Messgröße entspricht, fallen etwa 68 % der Messergebnisse.



Die Bestimmung von Messunsicherheiten → S. 146

# Methoden sind wichtig

154

6 Grundlagen der Auswertung von Teilchenphysikmessungen

## Was sind „Blinde Analysen“?

Der Placebo-Effekt bei Forschenden

Wenn ein Experiment richtig durchgeführt wurde und alle Unsicherheiten gründlich abgeschätzt wurden, dann müssten die Daten selbst die beste Richtschnur sein, um zu lernen, welche Entdeckungen in den Daten verborgen sind. Jedoch: Vorsicht!

Die Messdaten und ihre genau bestimmten statistischen und systematischen Unsicherheiten sind quasi ein „Richter“ über die wissenschaftlichen Hypothesen. Aber wann immer man die gemessenen Daten nicht als Richter, sondern gleichsam als „Detektiv“ zum Aufspüren neuer Hypothesen verwendet, ist die Wahrscheinlichkeit von Problemen groß. Dieses Phänomen ist auch aus anderen wissenschaftlichen Bereichen bekannt: Die Studien zur Messung der Wirksamkeit und der Sicherheit z. B. eines Impfstoffs werden immer *blind* durchgeführt. Weder die Probanden noch das verabreichende medizinische Personal weiß, ob ein bestimmter Proband Impfstoff oder Placebo erhält; und diejenigen, die die Daten auswerten, haben keinen Kontakt zu denen, die die Probanden betreuen. Das Design der Studie und alle Auswertungs- und Abbruchkriterien müssen vor Beginn der Datennahme festgelegt werden. Werden diese Kriterien nicht strikt eingehalten, kann den Ergebnissen der Studie nicht getraut werden, weil die Wahrnehmung z. B. von Nebenwirkungen bewusst oder unbewusst von der Kenntnis der zugrunde liegenden Behandlung verzerrt wird.

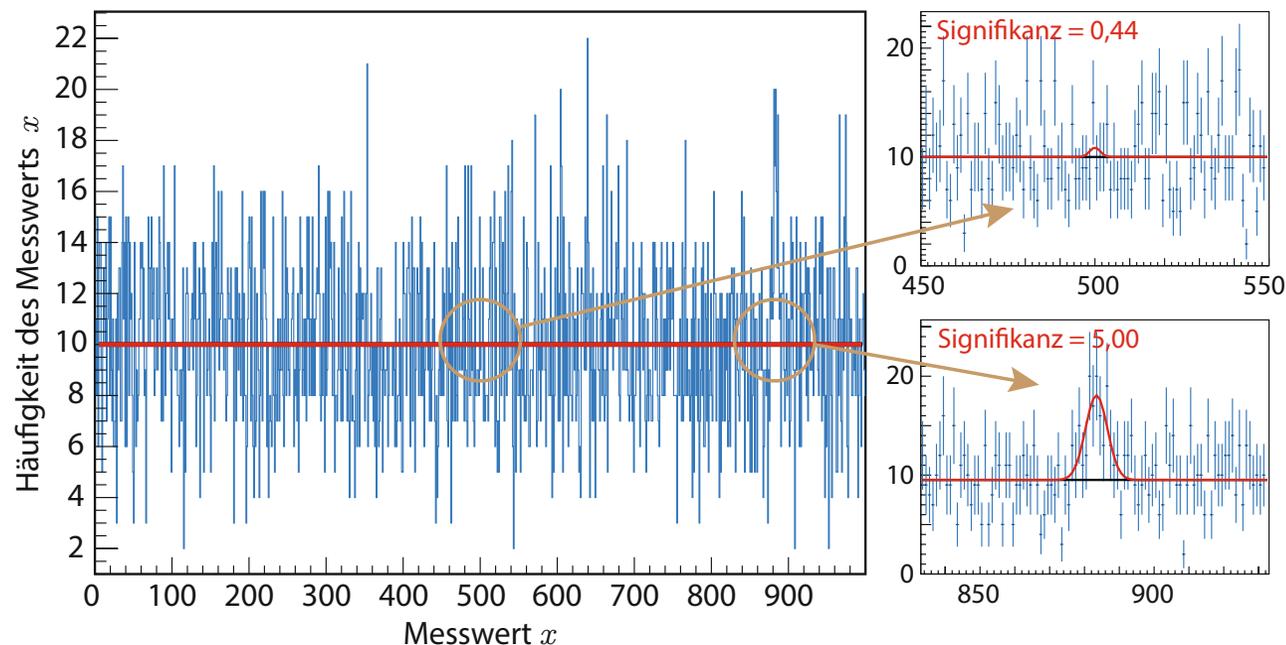
Nun sind Teilchen keine Probanden und Detektoren kein medizinisches Personal, deren Wahrnehmung durch unterbewusste Prozesse auch im Fall bester

Motive unvermeidbar beeinflusst wird. Warum also sollte auch in der Teilchenphysik eine *blinde* Analyse notwendig sein? Um das zu zeigen, sollen hier wieder simulierte Messungen verwendet werden: Angenommen, die Teilchenphysikerinnen und -physiker führen ein Experiment durch, das Messwerte zwischen dem Wert 0 und 1.000 messen kann. Der schon bekannte Untergrundprozess habe eine mittlere Häufigkeit von 10 Ereignissen pro einer Einheit des Messwerts und sei überall gleich wahrscheinlich ( $\perp$ ). Ist kein neues Signal vorhanden, wird eine beispielhafte Messung aufgrund der erwarteten statistischen Unsicherheit eine Schwankung der gemessenen Rate (blau) um den Wert 10 ergeben.

Wenn die Daten nur als Richter über eine neue Hypothese verwendet werden sollen, aber nicht als Detektiv, darf die Entscheidung über die Methode der statistischen Analyse der Daten nicht von den gemessenen Daten selbst abhängen. Hier bedeutet das: Die Hypothese, wo in den Daten das Signal erwartet wird, darf nicht von den Daten abhängen, sondern muss *blind* getroffen werden. Hier soll angenommen werden, dass aufgrund einer neuen Theorie das vorhergesagte neue Signal bei einem Messwert von 500 in der Form einer Gaußverteilung auftreten soll. Im gezeigten Beispiel kann beim Wert 500 kein signifikanter Anteil des Signals ( $\perp$ ) gefunden werden.

Bisher wurden die Daten als Richter, nicht aber als Detektiv verwendet. Führt man die Analyse nicht *blind* durch, sondern lässt sich von den Daten leiten, dann

## Häufigkeit des Auftretens des Messwerts $x$



Ein simuliertes Experiment. An einer vorgegebenen Stelle in der Mitte der Verteilung findet sich selten ein zufälliger Überschuss. Aber *irgendwo* in der Verteilung ist oft ein sehr signifikanter Überschuss vorhanden

Statistik → S. 80 und Messunsicherheiten → S. 82  
Schlüsse ziehen aus Statistik → S. 148

# Analogien helfen

140

6 Grundlagen der Auswertung von Teilchenphysikmessungen

Trigger und Datenverarbeitung

141

## Trigger und Datenverarbeitung

Der Weg der Nadel im Heuhaufen vom Detektor auf die Festplatte

Teilchenphysikexperimente dienen dazu, die interessanten Eigenschaften der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen aufzunehmen. Vom Ergebnis jeder einzelnen Reaktion zwischen Teilchen wird gleichsam ein Bild gemacht. Eine große Herausforderung ist aber die Frage: Wann und von was soll der Detektor ein Bild machen? Und ist es interessant genug, um die rekonstruierte Information über die gemessenen Prozesse auf einem Speichermedium aufzubewahren? Es kann zwei Gründe für diese Frage geben: Entweder passiert nur recht selten etwas Interessantes (etwa in der Suche nach einer Wechselwirkung von Neutrinos (Große Detektoren tief im Berg  $\downarrow$ ) oder Dunkler Materie), oder es passiert quasi andauernd etwas, und es muss entschieden werden, was davon interessant und was uninteressant ist. Die für diese Entscheidung notwendige Komponente der Experimente heißt *Trigger*.

Ein typischer Trigger besteht aus mehreren Stufen und ist in den meisten Experimenten eng mit der Weiterverarbeitung der Daten in Computern verbunden: der *Data Acquisition*, also der Entnahme aller Daten aus dem Detektor, der Kalibrierung der Rekonstruktionsalgorithmen und der Rekonstruktion der Ereignisse. In einem Experiment wie dem ATLAS- oder dem CMS-Experiment ( $\downarrow$ ) am LHC ( $\downarrow$ ) am CERN geschehen etwa 1,7 Milliarden Kollisionen von Protonen pro Sekunde – im Idealfall fast andauernd, mit nur kurzen Pausen, wenn der Beschleuniger mit neuen Teilchenpaketen befüllt wird. Dabei entsteht in den einzelnen Detektoren etwa ein Petabyte an Daten pro Sekunde. Das wäre der Inhalt von 1.000 jeweils ein Terabyte



großen Festplatten pro Sekunde. Diese Datenmenge kann in ihrer Gesamtheit nicht gespeichert werden. Sie kann sogar noch nicht einmal schnell genug aus den in den Detektor eingebauten Chips entnommen werden. Doch ein Großteil der Ereignisse ist für die Auswertung nicht besonders interessant: Dass irgendeine schon gut bekannte Wechselwirkung am LHC passiert, ist z. B. in etwa eine Milliarde mal wahrscheinlicher, als dass ein für die Forschenden von heute interessantes Higgs-Boson produziert wird ( $\downarrow$ ).

Der Trigger soll also so genau wie möglich alle Ereignisse mit interessanten Teilchen finden und aufzeichnen und von den uninteressanten nur ein paar, die entweder falsch identifiziert wurden oder notwendig zur Überprüfung der Funktion des Triggers sind. Es werden also nur deshalb mit gewaltigem Aufwand 1,7 Milliarden Kollisionen pro Sekunde produziert, gemessen, und dann vom Trigger fast gänzlich weggeworfen, damit unter den etwa 2.000 vom Trigger aufgezeichneten Ereignissen pro Sekunde in etwa ein Higgs-Boson ist.



Ereignisse (1,7 Milliarden Kollisionen pro Sekunde)

viele Details,  
Originalfarben

Illustration der Funktion des Triggers: die leichtere Erkennung der Nadel im Heuhaufen (unten Mitte) durch die Reduktion auf das Wesentlichste

die Stecknadel rot und sticht hervor. Dieses Ereignis wird also komplett mit aller Information aus dem Detektor ausgelesen und weiter verarbeitet, die anderen beiden verworfen.

wenige Details,  
Falschfarben

Die Fotos der Suche nach der Nadel im Heuhaufen illustrieren, wie der Trigger das macht: Die obere Zeile zeigt drei verschiedene „Ereignisse“ mit der vollen Information, die dem Detektor aufgrund der ungeheuren Datenmenge nicht entnommen werden kann. Deshalb wird in der ersten Triggerstufe nur die relevanteste Information entnommen – in der zweiten Zeile dargestellt durch die Helligkeit und die rote Farbe, da die Physikerinnen und Physiker – bildlich gesprochen – von ihrem gesuchten Ereignis erwarten, dass es eine rote Komponente enthält. In der Realität könnte dies z. B. Information aus Kalorimetern (Energimessung  $\downarrow$ ) und speziellen Komponenten des Myondetektors sein. Aber auch in der mittleren Zeile ist die Stecknadel noch schwer zu finden, und die Ereignisse sind immer noch sehr detailliert, beinhalten also immer noch zu viele Informationen, um sie dem Detektor zu entnehmen. Daher werden die Daten weiter reduziert, wobei die Vereinfachung so optimiert wird, dass die Eigenschaften der echten gesuchten Ereignisse möglichst gut erhalten bleiben. Das stellt die unterste Zeile dar: Der Kontrast ist reduziert und die Auflösung stark vereinfacht. Und siehe da: Nun ist im unteren mittleren Bild nur noch

Sehr stark ist der Kontrast aber immer noch nicht. In vielen Experimenten stellt der Trigger eine der herausforderndsten Komponenten dar. Ein Fehler im Design des Triggers könnte bedeuten, dass große Entdeckungen verpasst werden. Würde das Ereignis jedoch aufgezeichnet, verbessert die folgende Kalibration und Rekonstruktion mit viel Aufwand das Bild weiter, und im Idealfall kann die Nadel im Heuhaufen gefunden werden.



Illustration des vollständig rekonstruierten Bildes: Die gespeicherten Bilder lassen in der Analyse die volle Information erkennen.

Große Detektoren tief im Berg  $\rightarrow$  S. 126  
Typische Detektoren an Beschleunigern  $\rightarrow$  S. 124  
Der LHC-Beschleunigerkomplex am CERN  $\rightarrow$  S. 112  
Die Hürden des Erfolgs  $\rightarrow$  S. 250

Energimessung von Teilchen  $\rightarrow$  S. 74

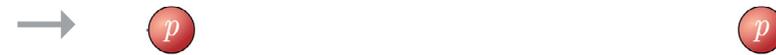


# Analogien helfen



# Anschauung hilft: Das Daumenkino

Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.



# Anschauung hilft: Das Daumenkino

Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.



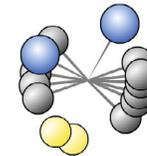
# Anschauung hilft: Das Daumenkino

Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.



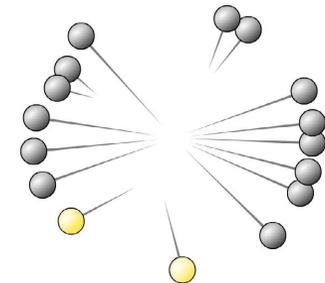
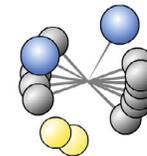
# Anschauung hilft: Das Daumenkino

Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.



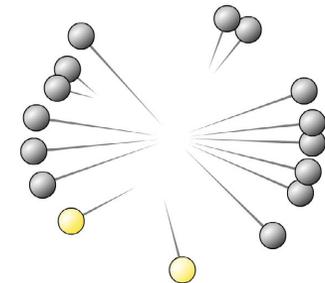
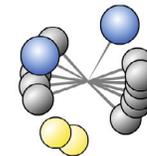
# Anschauung hilft: Das Daumenkino

Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.



# Anschauung hilft: Das Daumenkino

Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.



# BACKUP

# Teilchenphysikexperimente sind nicht immer riesengroß

296

11 Die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells

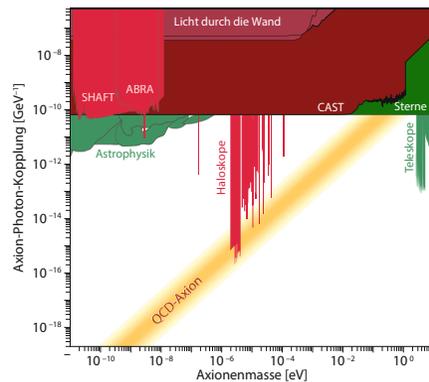
Die Suche nach Axionen

297

## Die Suche nach Axionen

Zwei Fliegen mit einer Klappe

Manchmal werden zur Lösung von Problemen mit dem Standardmodell neue Teilchen erfunden. Ein Beispiel dafür sind *Axionen*. Sie sind ein Nebenprodukt einer vorgeschlagenen Lösung des starken *CP*-Problems (↓). Die mathematische Beschreibung der starken Wechselwirkung im Standardmodell lässt Beiträge zu, welche die *CP*-Symmetrie verletzen (↓). Bisher hat man keinerlei Anzeichen dafür gefunden, so dass die *CP*-verletzenden Beiträge der starken Wechselwirkung verschwinden oder mindestens zehn Größenordnungen kleiner sein müssen als erwartet.

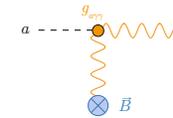


Kopplungsstärke von Axionen  $g_{a\gamma\gamma}$  gegen ihre Masse  $m_a$  aufgetragen. Der gelbe Bereich zeigt Axionen aus der Lösung des starken *CP*-Problems (QCD-Axionen). Mit Massen  $m_a$  von  $10^{-6}$  eV bis  $10^{-4}$  eV könnten sie auch die Dunkle Materie erklären. Außerhalb des Bandes befinden sich ALP. Die farbigen Bereiche sind durch Experimente und astronomische Beobachtungen ausgeschlossen.

Durch eine zusätzliche Symmetrie, die sogenannte *Peccei-Quinn-Symmetrie*, die spontan gebrochen sein muss (↓), kann man das erklären. Der *CP*-verletzende Term wird dadurch zu null, was aber auch zur Existenz eines neuen Teilchens – hier Axion genannt – führt. Die Eigenschaften des Axions machen aus dem zunächst lästigen Nebenprodukt auch ein Teilchen zur möglichen Erklärung, wozu die Dunkle Materie (↓) im Universum besteht. Die Materie im Universum wird durch eine unsichtbare Dunkle Materie dominiert, für die es im Standardmodell keine Erklärung gibt. Axionen könnten eine Lösung sein, mit der schönen Eigenschaft, dass man sie prinzipiell in entsprechenden Experimenten nachweisen könnte: Nach der Theorie koppeln Axionen an Photonen externer Felder, z. B. in Magnetfeldern, und erzeugen dabei ein reelles Photon. Axionen und Photonen können sich so in Magnetfeldern ineinander umwandeln. Wenn Axionen mit passenden Eigenschaften zur Lösung des starken *CP*-Problems existieren, dann besteht ein direkter Zusammenhang zwischen ihrer Masse  $m_a$  und ihrer Kopplung an Photonen  $g_{a\gamma\gamma}$  (gelbes Band in der Abbildung).

Wenn QCD-Axionen die Dunkle Materie wären, so würden sie überall um uns herum existieren. Bei der Umwandlung in ein Photon wird die Masse  $m_a$  in Photonenenergie überführt, was im passenden Massenbereich Mikrowellenphotonen im Gigahertz-Frequenzbereich entspricht. Das Experiment ADMX sucht seit vielen Jahren nach dem Auftauchen von solchen Photonen. Um die Wahrscheinlichkeit zur Umwand-

Feynman-Graph der Kopplung von Axionen an Photonen. Das Axion koppelt an ein Photon eines externen Magnetfeldes und wandelt sich in ein reelles Photon um.



lung von Axionen zu Photonen zu erhöhen, führt man diese Suche bei sehr tiefen Temperaturen in einem Hohlraumresonator durch, der auf eine bestimmte Photonen-Frequenz ausgelegt ist. Mit der Abstimmung auf eine bestimmte Frequenz kann immer nur in einem sehr schmalen Massenbereich nach Axionen gesucht werden. Mit neuen Ideen, wie zum Beispiel im MADMAX-Projekt, versucht man daher, die Suche effektiver zu gestalten. In einem Magnetfeld können sich an den Oberflächen dielektrischer Platten Axionen der Dunklen Materie in eventuell detektierbare Photonen umwandeln. Durch Veränderung der Plattenabstände kann man verschiedene Photonfrequenzen verstärken.

Axion-ähnliche Teilchen, die dem Zusammenhang zwischen ihrer Masse  $m_a$  und ihrer Kopplung an Photonen  $g_{a\gamma\gamma}$  nicht folgen (außerhalb des gelben Bandes in der Abbildung), nennt man ALPs (Axion Like Particles). ALPs hätten mit dem starken *CP*-Problem nicht unbedingt etwas zu tun, könnten aber die Dunkle Materie erklären. Die Suche nach ALPs entwickelt sich

spektakulär. Das Ziel eines ebenfalls ALPS genannten Experimentes am DESY in Hamburg ist es, mit Licht durch eine Wand zu leuchten. Ein starker Laser leuchtet durch ein Magnetfeld und trifft auf eine Wand. Wandelt sich ein Photon in ein ALP um, so kann es die Wand durchdringen. Hinter der Wand befindet sich ein weiteres Magnetfeld, in dem sich die ALPs wieder in Photonen zurückverwandeln könnten. Sollte es gelingen, hinter der Wand Photonen zu messen, also durch die Wand zu leuchten, wäre das ein sehr starker Hinweis auf die Existenz von ALPs.

In der Sonne herrschen perfekte Bedingungen, Axionen oder ALPs zu erzeugen. Daher sucht man mit sogenannten Helioskopen wie IAXO oder dem Vorgängereperiment CAST nach Axionen oder ALPs von der Sonne. Dazu schaut man mit einem Teleskop durch ein Magnetfeld hindurch zur Sonne. Im Magnetfeld wandeln sich die Teilchen in Photonen um, die dann beobachtet werden können.

Bisher hat man keine Axionen oder ALPs gefunden. Da man sich durch ihre Existenz eventuell die Lösung von gleich zwei Problemen mit dem Standardmodell der Teilchenphysik erhofft, lohnen sich die wachsenden Anstrengungen, weiter nach ihnen zu suchen.



Magnet des ALPS-Experiments, um „Licht durch die Wand“ zu leuchten



CAST-Experiment. Durch den Magneten (blaue Röhre) wird die Sonne beobachtet und nach Photonen gesucht, die durch Umwandlung von solaren Axionen im Magnetfeld entstehen.

Das starke *CP*-Problem → S. 272  
Diskrete Symmetrien: *P*- und *CP*-Verletzung → S. 178  
Spontane Symmetriebrechung → S. 58  
Dunkle Materie → S. 268



# Teilchenphysik dreht sich nicht nur um Entdeckungen

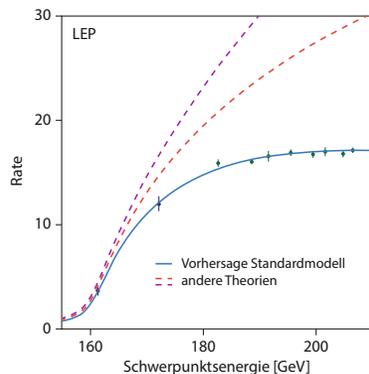
228

9 Der Triumph des Standardmodells und darüber hinaus

## Warum ausgerechnet das Standardmodell?

Präzisionsphysik am LEP und Vorhersage des Higgs-Bosons

Das Standardmodell ( $\downarrow$ ) der Elementarteilchenphysik ist zum Zeitpunkt des Erscheinens dieses Buches die unumstrittene Messlatte, an der sich alle Theorien über den fundamentalen Aufbau der Natur messen lassen müssen. Doch warum ist das so? Nur weil es zufällig sechs Quarks und sechs Leptonen enthält, diese als Teilchen auch entdeckt wurden, und man wie aus Bauklötzchen daraus andere Teilchen wie Protonen und Neutronen und daraus Kerne zusammenbauen kann? Die Geschichte der Entdeckungen der Teilchen legt es manchmal nahe, dass die „richtigen“ Teilchen vorherzusagen und zu entdecken der Hauptinhalt der Teilchenphysik ist.



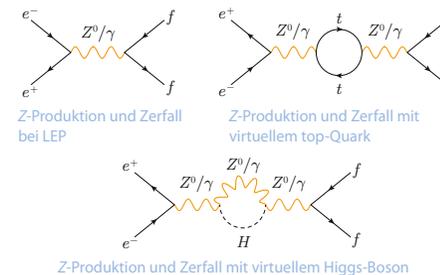
Die gemessene Rate des  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ -Prozesses als Funktion der Schwerpunktsenergie stimmt genau mit dem Standardmodell, aber nicht mit alternativen Theorien überein.

Der größte Teil der Arbeit der Teilchenphysik liegt aber in der sehr genauen Vermessung und Berechnung der Eigenschaften der Teilchen und ihrer Wechselwirkungen. Wie viel Information darin liegt, sieht man vor allem am Beispiel des LEP-Beschleunigers am CERN, der mit den vier Experimenten ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL von 1990 bis zum Jahr 2000 betrieben wurde. Mit 27 km Umfang war er der bis dahin größte Beschleuniger. Im Gegensatz zu den Proton-Antiproton-Beschleunigern SpS und Tevatron, wo  $W$ - und  $Z$ -Boson sowie das top-Quark entdeckt wurden, beschleunigte er aber Elektronen und ihre Antiteilchen, die Positronen, und brachte sie zur Kollision. Dabei werden zwar niedrigere Energien erreicht – „nur“ 90 bis 209 GeV im Gegensatz zu den 1.960 GeV des Tevatrons – aber dafür werden Elementarteilchen direkt zur Kollision gebracht. Es kollidieren also nicht zwei Bälle aus Gluonen und Quarks, wie im Fall von Protonen und Antiprotonen, sondern zwei quasi punktförmige Objekte mit genau bekannten Eigenschaften.

Daraus ergeben sich viele Vorteile. Vor allem werden viele Messungen sehr viel genauer. Wie viel Information in ihnen steckt, verdeutlicht das Bild (links) der Messung der Häufigkeit der Produktion eines Paares aus  $W$ -Bosonen in Abhängigkeit von der genau bekannten Energie der kollidierenden Elektronen und Positronen. Die gemessenen Werte der Häufigkeit (schwarze und grüne Punkte) entsprechen genau der Vorhersage des Standardmodells (blaue Linie) und sind weit von alternativen Theorien (gestrichelte Linien) entfernt. Jede Theorie der Natur, die das Standardmodell als funda-

Warum ausgerechnet das Standardmodell?

229

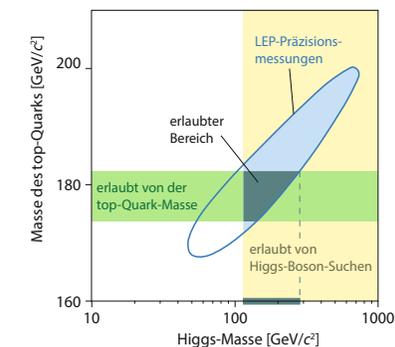


mentale Beschreibung der Natur ablösen soll, muss in dieser und sehr vielen anderen Messungen mindestens so gut mit den Daten übereinstimmen wie das Standardmodell – und das ist nicht einfach!

Dieses Prinzip lässt sich nicht nur auf direkt bei LEP produzierte Teilchen wie das  $W$ -Boson anwenden, sondern auch auf solche, die während der Laufzeit von LEP noch unentdeckt, aber vom Standardmodell vorhergesagt waren. Die drei Feynman-Graphen oben zeigen die Produktion eines Fermion-Antifermion-Paares bei LEP (QCD  $\downarrow$ ). Das kann z. B. *direkt* passieren, oder es können andere Teilchen in *Schleifen* ( $\downarrow$ ) im Zwischenzustand auftreten, obwohl diese zu viel Masse haben, um im Endzustand produziert zu werden. Trotzdem beeinflussen sie laut Standardmodell die genaue Vorhersage der Eigenschaften der Fermion-Antifermion-Paare im Endzustand. Weil deren Eigenschaften von LEP mit nie vorher dagewesener Genauigkeit gemessen werden konnten, und alle Messungen mit dem Standardmodell übereinstimmen (Breite des  $Z$ -Bosons  $\downarrow$ ), kann das Messprinzip umgedreht werden: Nur wenn es ein Teilchen gibt, das sich genauso verhält wie das zum Zeitpunkt der Messungen am LEP noch

nicht direkt beobachtete Higgs-Boson des Standardmodells, dann kann die Messung erklärt werden! Die genauen Messungen in Zusammenhang mit der Vorhersagekraft der Theorie erlauben sogar die Vorhersage der Masse des Higgs-Bosons vor seiner Entdeckung: Dort, wo sich in der Darstellung der Teilchenmassen die blaue Kontour der LEP-Messungen von Fermion-Antifermion-Paarproduktion und die grüne Fläche der Massenmessung des top-Quarks vom Tevatron überschneiden, also bei einer Higgs-Masse von 114,4 bis ca. 280  $\text{GeV}/c^2$ , muss das Higgs-Boson des Standardmodells zu finden sein. Nun scheint es doch wieder nur um eine Entdeckung zu gehen. Doch die Vorhersage dieser Entdeckung war nur aufgrund einer nie dagewesenen Konsistenz aller Messungen mit einer einzigen vorhergesagten Theorie möglich. Welch ein Triumph war es daher, dass genau in dem vorhergesagten Massenbereich wirklich im Jahr 2012 am LHC das 1964 erstmals vorhergesagte Higgs-Boson gefunden wurde!

Dort, wo sich die blaue Ellipse, die grüne Linie und der gelbe Bereich überlagern, liegt die Vorhersage der Masse des Higgs-Bosons durch Präzisionsmessungen, bevor es entdeckt wurde.



# Wissenschaft als lebendes offenes Zukunftsprojekt

236

9 Der Triumph des Standardmodells und darüber hinaus

Das Myon

237

## Das Myon

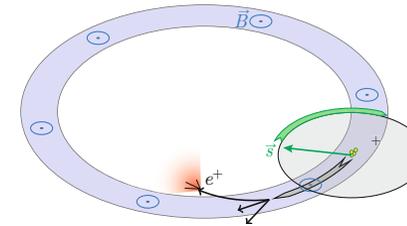
### Schweres Schwesterteilchen des Elektrons

Als das Myon 1936 entdeckt wurde, hatte man eigentlich keine Verwendung dafür. Seit Anfang der 1930er Jahre war der Aufbau der Atome aus Protonen, Neutronen und Elektronen erklärt. Weitere Teilchen waren eigentlich nicht nötig. Der Nobelpreisträger I. Rabi kommentierte die Entdeckung des Myons daher mit dem Ausspruch „Who ordered that?“ (4) Das Myon hat viele Gemeinsamkeiten mit dem Elektron, wie zum Beispiel elektrische Ladung und Spin. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass es etwa 200 Mal schwerer als das Elektron ist. Diese Eigenschaft macht das Myon für Untersuchungen in der Teilchenphysik besonders interessant. An anderer Stelle wurde über das anomale magnetische Moment des Elektrons (4) berichtet. Das magnetische Moment (Spin  $\downarrow$ ) bestimmt, wie schnell sich der Spin eines Teilchens im Magnetfeld dreht. Beschrieben wird das magnetische Moment durch den sogenannten *g-Faktor*. Für Leptonen, wie zum Beispiel das Elektron oder das Myon, wird von der Diracgleichung, der relativistischen Variante der Schrödingergleichung, ein Wert  $g = 2$  vorausgesagt. Aufgrund quantenfeldtheoretischer Korrekturen höherer Ordnung erwartet man Abweichungen, die man einerseits sehr genau im Rahmen des Standardmodells berechnen kann und andererseits sehr genau messen kann. Die relative Abweichung des *g-Faktors* vom Wert 2,  $a = (g - 2)/2$  wird als *anomales magnetisches Moment* bezeichnet.

Da Myonen zunächst in ausreichender Zahl aufwändig mithilfe von Beschleunigern erzeugt werden müssen und schon wieder nach einigen Mikrosekunden zer-

fallen, ist es nicht überraschend, dass Messungen an Myonen deutlich komplizierter sind als an Elektronen. Eine Konsequenz ist, dass man das anomale magnetische Moment des Myons nur mit einer Genauigkeit messen kann, die um einen Faktor 1.000 schlechter als beim Elektron ist. Man kann sich jetzt die Frage stellen, ob sich der Aufwand trotzdem lohnt. Die Antwort ist ein klares „Ja“. Ziel solcher Messungen ist immer, das Standardmodell auf die Probe zu stellen. Es kommt daher nicht nur darauf an, wie genau man eine Größe messen kann, sondern auch, welche Abweichungen man erwartet, wenn Physik jenseits des Standardmodells beiträgt. Da man diese Physik noch nicht kennt, ist das natürlich schwer abzuschätzen. Dennoch gilt als Faustregel: Je schwerer ein Teilchen ist, desto eher machen sich Einflüsse noch unbekannter Teilchen und Wechselwirkungen bemerkbar. Daher erwartet man so-

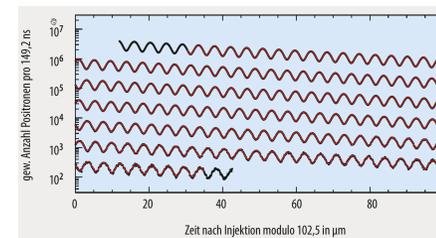
Der im Experiment verwendete Magnet wurde in einem früheren Experiment am Brookhaven National Laboratory auf Long Island verwendet. Das Bild zeigt den Magneten beim Transport zum Fermi National Accelerator Laboratory bei Chigago, wo der Magnet in einem Nachfolgeexperiment wiederverwendet wurde.



Prinzipieller Aufbau des Experiment

gar eher beim Myon trotz der geringeren Messgenauigkeit signifikante Abweichungen vom Standardmodellwert.

Um das anomale magnetische Moment des Myons zu messen, erzeugt man zunächst Myonen, indem ein Protonenstrahl auf ein Target gelenkt wird. Dort entstehen Pionen, die wiederum in Myonen zerfallen. Es handelt sich um einen Zerfall der schwachen Wechselwirkung, was zur Folge hat, dass die Spins der Myonen parallel ausgerichtet sind. Die Myonen laufen dann in einem ringförmig angeordneten supraleiten-



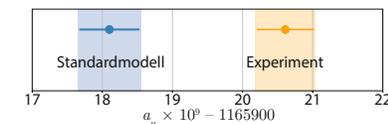
Zeitspektrum der Zerfallspositronen aus dem Myonzerfall. Die beobachtete Modulation ist direkt proportional zum gesuchten anomalen magnetischen Moment  $a$ .

den Magneten. Dabei dreht sich auch ihr Spin mit einer Frequenz, die direkt Aufschluss über das gesuchte anomale magnetische Moment  $a$  gibt. Innerhalb einer Millisekunde zerfallen fast alle Myonen in ein Positron und zwei Neutrinos:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Das Positron wird dann in Detektoren nachgewiesen. Der Zerfall hat die schöne Eigenschaft, dass die Richtung des nachgewiesenen Positrons eine Aussage über die aktuelle Richtung des Myon-Spins macht. Daher kann man aus den im Zeitspektrum der Zerfallspositronen beobachteten Oszillationen (siehe Abbildung unten links) direkt die gesuchte Größe  $a$  bestimmen.

Die Abbildung unten rechts zeigt einen Vergleich des Messwertes mit dem aus dem Standardmodell berechneten Wert. Die Werte stimmen nicht überein. Etwas quantitativer ausgedrückt kann man sagen: Wenn Theorie und Experiment übereinstimmen würden, dann würde man nur in einem von 40.000 Wiederholungen des Experiments eine Abweichung, die größer als die hier beobachtete ist, erwarten. Diese Diskrepanz gibt Physikerinnen und Physikern einerseits Rätsel auf, andererseits lässt sie Raum, um Erweiterungen des Standardmodells vorzuschlagen, die zusätzliche Beiträge zum Theoriewert liefern und diesen wieder in Einklang mit dem experimentellen Wert bringen.



Gegenüberstellung des im Standardmodell berechneten und des gemessenen Werts des anomalen magnetischen Moments des Myons



# Wissenschaft als lebendes offenes Zukunftsprojekt

## Die Hürden des Erfolgs

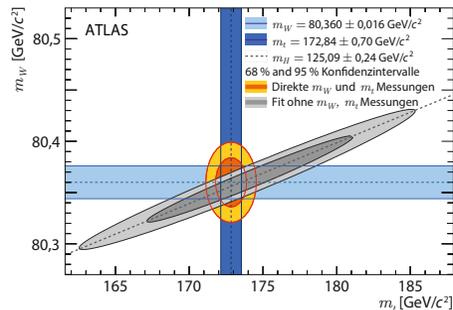
Worüber neue Theorien springen müssen

Es ist ein wichtiger Teil der theoretischen Physik, neue Ideen zur Beschreibung der Natur zu entwickeln. Große Durchbrüche in der Kulturgeschichte der Menschheit sind mit ihnen verbunden: zum Beispiel das heliozentrische Weltbild von Kopernikus, Kepler und Galilei oder die Newton'sche Mechanik oder die Entwicklung der modernen Physik mit Quantenmechanik und Relativitätstheorie, auf denen unsere moderne Informationsgesellschaft in Gestalt der Quantenzustände in Computerchips basiert.

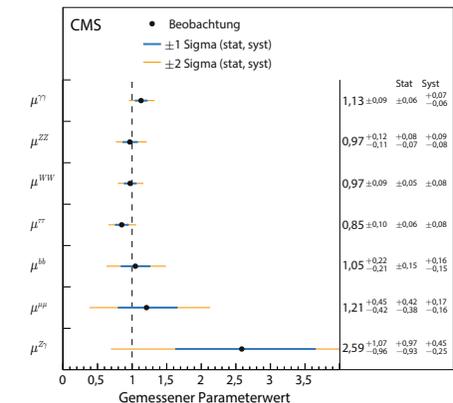
Eine solche Revolution zu erleben wäre ein großartiges Ereignis. Aber alle diese vorangegangenen Revolutionen beruhen nicht nur auf ein paar sehr hellen Geistern, die neue Theorien erschaffen, sondern ebenso auf jahrzehntelangen präzisen Ausarbeitungen der Vorhersagen von Theorien sowie gründlichsten Experimenten und genauesten Messungen.

So ist es auch heute: Die Teilchenphysikerinnen und -physiker hoffen, am Anfang des Endes des Standardmodells der Elementarteilchenphysik als beste und vollständige Beschreibung des Mikrokosmos zu stehen. Wir hoffen durch verbesserte Experimente konkretere Hinweise auf die kommende Revolution zu erhalten. Ein sehr wichtiges Charakteristikum dieser Revolutionen ist aber: Sie müssen weiterhin alle bisherigen Expe-

Die gemessenen Eigenschaften des Higgs-Bosons in Form der gemessenen Kopplungen in sieben verschiedenen Endzuständen stimmen mit der Standardmodellervorhersage mit dem Wert 1 überein.



Die gemessenen Massen von top-Quark  $t$ ,  $W$ -Boson und Higgs-Boson  $H$  sind im Standardmodell miteinander konsistent: Alle Messungen treffen sich an einem Punkt.



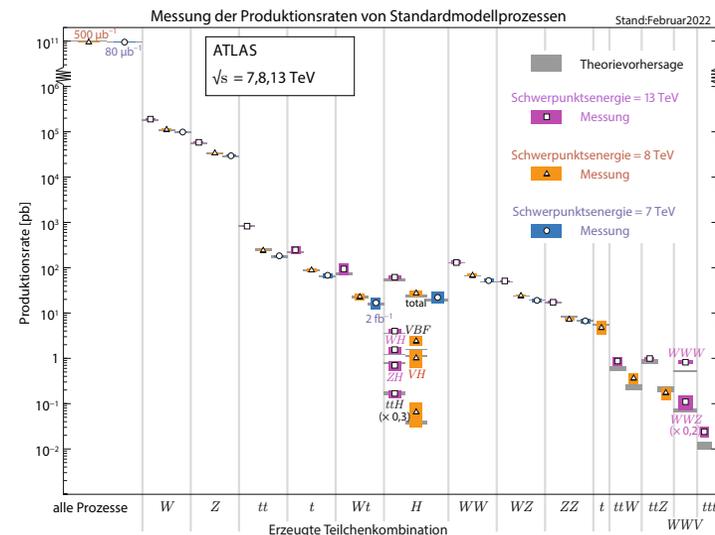
perimente erklären – schließlich waren die Experimente nicht falsch. Jede neue Theorie muss daher all das fast exakt so (nämlich innerhalb teils winziger Unsicherheiten (Präzisionsexperimente ↓)) erklären, wie es das Standardmodell auch tut. Die Forschenden sagen: Die bessere, fundamentalere, einfachere, schönere, umfassendere neue Theorie muss die alte mit enthalten. So war es auch in der Vergangenheit.

Es reicht also nicht, zum Beispiel zu behaupten: „Wir leben in Wahrheit in einer Computersimulation, in der z. B. zelluläre Automaten die fundamentale Einheit darstellen“. Das mag eine interessante Vorstellung (↓) sein – als physikalische Theorie ernstzunehmen wäre

sie erst, wenn diese hypothetische Theorie zellulärer Automaten mindestens all das innerhalb der Messunsicherheiten *genau* so erklären würde, was vom Standardmodell erfolgreich erklärt wird! Und diese erfolgreiche komplett alternative Theorie gibt es bisher nicht.

Die wachsende Herausforderung für die Theoretikerinnen und Theoretiker: Die Menge an präzisen Messungen aus der Geschichte der Teilchenphysik (auf dieser Seite in ausgewählten Beispielen festgehalten) ist enorm. Diese Messungen stimmen unter Berücksichtigung der zu erwartenden Verteilung der Messergebnisse innerhalb ihrer Unsicherheiten (↓) alle mit dem Standardmodell überein. Dieses gesamte Erbe der präzisen Messungen der

Teilchenphysik soll eine zukünftige einfachere Theorie auch mit beschreiben, plus viele neue Phänomene: eine monumentale Aufgabe.



Die Vorhersagen der Produktionsraten von verschiedenen Prozessen am LHC stimmen über 13 Zehnerpotenzen mit dem Standardmodell überein.

Präzisionsexperimente → S. 234  
Vorstellung und Realität → S. 28  
Schlüsse ziehen aus Statistik → S. 148



# Wissenschaft als lebendes offenes Zukunftsprojekt

254

10 Die Grenzen des Standardmodells

## Warum wir weitersuchen

### Ungelöste Probleme im Standardmodell

Mit der Entdeckung des Higgs-Bosons 2012 war das Standardmodell der Teilchenphysik vollständig. Als komplette Theorie ist es ein grandioser Erfolg; es beschreibt alle bisherigen Laborexperimente, z.T. mit sensationeller Präzision. Die Experimente spannen mehr als 13 Größenordnungen in der Energie, von weniger als 1 eV in der Atomphysik bis zu 13 TeV am LHC.

Mithilfe des Standardmodells reicht unser Verständnis weit hinaus (Urknall  $\downarrow$ ) ins Universum. Wir verstehen im Detail, wie die Sonne funktioniert, einschließlich des Stroms von Neutrinos ( $\downarrow$ ), der seinen Ursprung tief im Inneren der Sonne hat. Im Zusammenspiel von Standardmodell und allgemeiner Relativitätstheorie verstehen wir die Zusammensetzung von Neutronensternen und die Streuung der Neutrinos in einer Supernova kurz nach der Explosion, die ihre Ankunft auf der Erde verzögern. Wir verstehen, wie die leichten Elemente Wasserstoff, Helium und Lithium in den ersten drei Minuten im frühen Universum erzeugt wurden und in welchem Mengenverhältnis ( $\downarrow$ ). Auch die Erzeugung der schwereren Elemente in Sternen ( $\downarrow$ ) verstehen wir weitgehend.

Da möchten wir uns zufrieden zurücklehnen und das Werk genießen – und doch schweift unser Blick weiter. Es tun sich neue Fragen auf, die uns ermutigen, weiterzusuchen. Hier präsentieren wir eine Liste der für uns wichtigsten *offenen* Fragen im Standardmodell. Ihre Beantwortung liegt in zukünftigen neuen Experimenten sowie in tieferliegenden theoretischen Strukturen.

1. Die unterschiedlichen Massen der über 100 verschiedenen Elemente im Periodensystem werden durch unser Verständnis des Atomaufbaus mit einem Kern ( $\downarrow$ ) aus Protonen und Neutronen sowie einer Schale aus Elektronen erklärt. Im Gegensatz dazu haben wir im Standardmodell zwölf verschiedene Fermionen, mit zum Teil sehr unterschiedlichen Massen, die nur durch freie Parameter beschrieben werden. Warum sind die Massen der Fermionen so unterschiedlich?

2. Wie groß sind die Neutrinomassen genau? Wir kennen die Differenz der Neutrinomassen, aber nicht die absoluten Werte. Insbesondere: Ist das leichteste Neutrino masselos? Haben die Neutrinos eine Dirac- oder eine Majoranamasse ( $\downarrow$ )? Und in Anlehnung an Punkt 1: Warum sind die Neutrinos so viel leichter als die anderen Fermionen im Standardmodell?

3. Warum ist die Ladung des Wasserstoffatoms exakt null? Experimentell wissen wir, dass die Summe aus Protonladung und Elektronladung geteilt durch den Betrag der Elektronladung  $(q_p + q_e)/e < 10^{-21}$  ist! Anders ausgedrückt: Warum sind die Ladungen der *u*- und *d*-Quarks genau  $+2/3 e$  bzw.  $-1/3 e$ ? Dieses Problem wird auch das *Problem der Ladungsquantisierung* genannt. In den vereinheitlichten Theorien (GUTs) gibt es eine Antwort. Aber sind die Kräfte vereinheitlicht? Haben sie einen gemeinsamen Ursprung?

4. Das Universum enthält eine große Menge an *Dunkler Materie*. Dies kann wahrscheinlich durch ein oder mehrere neue(!) Elementarteilchen erklärt werden. Im

Warum wir weitersuchen

255

Standardmodell geht das nicht. Was sind diese neuen Teilchen? Wie können wir sie nachweisen? Und wie fügen sie sich in die Gesamttheorie ein?

5. Das Universum fing als extrem heißes Plasma nach dem Urknall an. Die Thermodynamik sagt uns, dass es in so einem heißen Zustand genauso viele Teilchen wie Antiteilchen geben muss und die Baryonenzahl sollte exakt null gewesen sein.

Heute beobachten wir im gesamten Universum nur Materie, keine Antimaterie. Die Baryonenzahl ist heute ungleich null. Wie konnte das Universum von seiner ursprünglichen Materie-Antimaterie-Symmetrie zur heutigen Asymmetrie übergehen, obwohl die Baryonenzahl im Standardmodell zu einem hohen Grad erhalten ist? Dies ist das Problem der *Baryogenese* ( $\downarrow$ ).

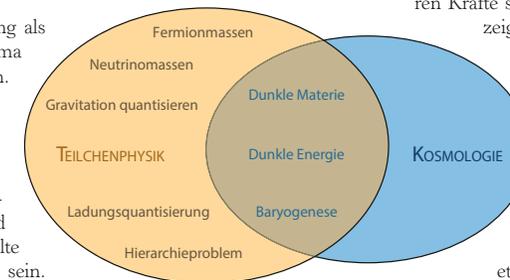
6. Wir beobachten heute eine beschleunigte Expansion des Universums, die mit einer kleinen Vakuumenergie zu erklären ist, auch *Dunkle Energie* ( $\downarrow$ ) genannt. Was ist der Ursprung dieser Vakuumenergie? Und wieso trägt die extrem viel größere Vakuumenergie im Standardmodell nicht zur Expansion des Universums bei?

7. Die drei Kräfte des Standardmodells sind alle durch Quantenfeldtheorien exzellent beschrieben. Was ist mit der Gravitation? Gibt es für sie auch eine zugrundeliegende Quantentheorie? Gibt es ein Graviton als Austauscheteilchen? Wir wissen es nicht. Eine Möglich-

keit bietet die Stringtheorie, die für Größenordnungen der Planck-Energieskala ( $10^{19}$  GeV) formuliert ist. Dort sollte die Gravitation von gleicher Stärke wie die anderen Kräfte sein. Aber wie können wir zeigen, dass es eine Stringtheorie gibt? Alle Vorhersagen sind bisher experimentell energetisch weit außerhalb der Reichweite heutiger Experimente.

8. Das Higgs-Boson hat eine Masse von etwa  $125 \text{ GeV}/c^2$ . Bei sehr kleinen Abständen,  $10^{-35}$  m, der Plancklänge (bzw. sehr hohen Energien,  $10^{19}$  GeV), sollte die Gravitation vergleichbare Stärke mit den anderen Kräften erlangen und es sollten Quanteneffekte auftreten. Diese sollten mittelbar oder gar unmittelbar in die Higgs-Masse einfließen und sie sehr viel größer machen als beobachtet. Dies ist das sogenannte *Hierarchieproblem*. Eine mögliche Lösung wäre die Theorie der Supersymmetrie ( $\downarrow$ ), die die Higgs-Masse vor den Hochenergiekorrekturen schützt. Für die Supersymmetrie gibt es aber noch keinen experimentellen Nachweis.

Das Standardmodell ist eine in sich abgeschlossene komplette Theorie. Wie wir hier beschrieben haben, gibt es aber vielfältige Fragen, die das Standardmodell aufwirft bzw. unbeantwortet lässt. Außerdem können wir mittlerweile so weit zurück und präzise in die Geschichte des Universums schauen, dass sich dadurch auch vielfältige kosmologisch unbeantwortete Fragen mit Bezug auf das Standardmodell ergeben.



Urknall  $\rightarrow$  S. 266  
Neutrinos von der Sonne  $\rightarrow$  S. 320  
Nukleosynthese im Urknall  $\rightarrow$  S. 306  
Elemententstehung in Sternen  $\rightarrow$  S. 308  
Von Nukleonen zu Kernen  $\rightarrow$  S. 210

Neutrinomassen  $\rightarrow$  S. 256  
Baryogenese  $\rightarrow$  S. 304  
Dark Sector: Dunkle Energie  $\rightarrow$  S. 270  
Supersymmetrie  $\rightarrow$  S. 260



# Wissenschaft als lebendes offenes Zukunftsprojekt

XVI

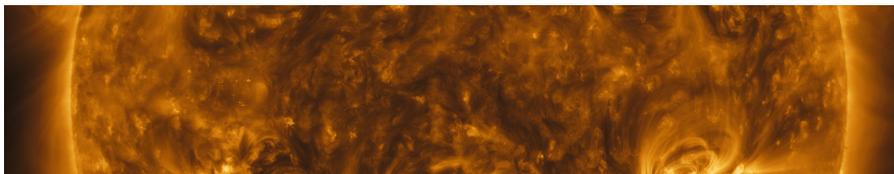
XVII

<b>10 Die Grenzen des Standardmodells</b> .....	<b>253</b>
Warum wir weitersuchen – Ungelöste Probleme im Standardmodell .....	254
Neutrinomassen – Warum so klein? .....	256
GUT – Die große Vereinheitlichung.....	258
Supersymmetrie – Wie viel Symmetrie ist möglich?.....	260
Extra-Dimensionen – Vielleicht ist die Gravitation ja gar nicht so schwach .....	262
Stringtheorie – Eine vibrierende Schnur als Vereinheitlichung.....	264
Urknall – Das erste Teilchenlabor.....	266
Dunkle Materie – Eine Herausforderung für die Elementarteilchenphysik.....	268
Dark Sector: Dunkle Energie – Eine Herausforderung für die Kosmologie und Elementarteilchenphysik....	270
Das starke CP-Problem – Wie Theoretiker Probleme wegwaschen.....	272
Ist das Leben auf der Erde ein Zufall? – Verstehen wir, warum Leben entstehen konnte?.....	274
<b>11 Die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells</b> .....	<b>277</b>
Ist das Neutrino sein eigenes Antiteilchen? – Die Suche nach dem neutrinolosen doppelten $\beta$ -Zerfall .....	278
Neue Teilchen am LHC – Suchen mit einer konkreten Idee.....	280
Das unspezifische Unbekannte am LHC – Suchen ohne konkrete Idee.....	282
Zusätzliche Raumdimensionen am LHC – Wohin verschwindet die Gravitation? .....	284
Das Rätsel der Dunklen Materie – Woher wissen wir, wonach wir suchen müssen?.....	286
Direkte Suche nach der Dunklen Materie – Auf der Jagd nach unsichtbaren Teilchen.....	288
Materie und Antimaterie – Warum gibt es uns überhaupt? .....	290
Teilchenphysik im Weltall – Hoch hinaus .....	292
Die Suche nach elektrischen Dipolmomenten – Wo ist die Antimaterie geblieben? .....	294
Die Suche nach Axionen – Zwei Fliegen mit einer Klappe.....	296
Protonenzerfall – Lang lebe das Proton!.....	298
Supernovae als Teilchenphysiklabore – Dramatische Ereignisse mit ungeahnten Fähigkeiten.....	300
<b>12 Die Verbindung des Größten mit dem Kleinsten</b> .....	<b>303</b>
Baryogenese – Wieso gibt es (fast) keine Antimaterie im Universum?.....	304
Nukleosynthese im Urknall – Helium, Neutrinos und die Materie-Antimaterie-Asymmetrie .....	306

Elemententstehung in Sternen – Wie war das mit dem Sternenstaub? .....	308
Kosmischer Mikrowellenhintergrund – Ein Blick ins frühe Universum und seine Zusammensetzung.....	310
Das Größte und das Kleinste – Einfluss der Neutrinomasse auf die großräumige Struktur im Universum... 312	
Kosmische Strahlung – Teilchen aus dem All .....	314
Ultrahochenergetische kosmische Strahlung – Die Suche nach den kosmischen Hochleistungsbeschleunigern .....	316
Multimessenger-Astronomie – Neue Blicke ins Teilchen-Universum.....	318
Neutrinos von der Sonne – Ein Blick ins Innere der Sonne.....	320
Die Entwicklung des Universums – Blick in die sehr ferne Zukunft .....	322



Loht sich das alles? .....	325
Danksagung.....	327
Die Eigenschaften der Elementarteilchen – Übersicht und Tabellen.....	328
Glossar.....	329
Bildnachweis.....	345
Index.....	352
Das Autorenteam.....	360



Das ab dieser Seite beginnende Daumenkino zeigt, wie zwei Wasserstoffkerne (Protonen) miteinander kollidieren. Neben vielen anderen Teilchen wird dabei ein Higgs-Boson produziert, das schon nach kurzer Zeit in zwei Photonen zerfällt. Mehr zur Entdeckung des Higgs-Bosons erfahren Sie u. a. ab S. 230.



# Das Autorenteam



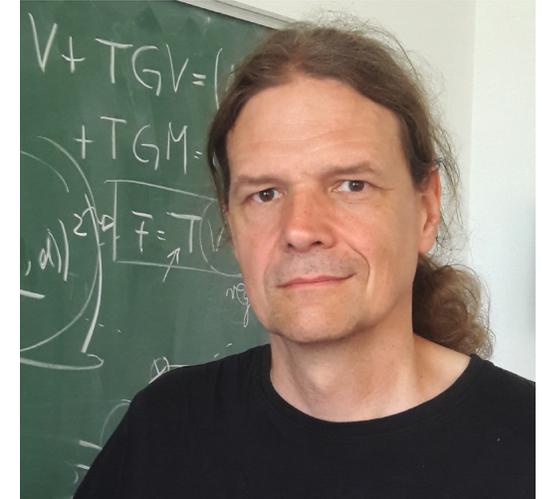
Philip Bechtle



Florian Bernlochner



Herbi Dreiner



Christoph Hanhart



Josef Jochum

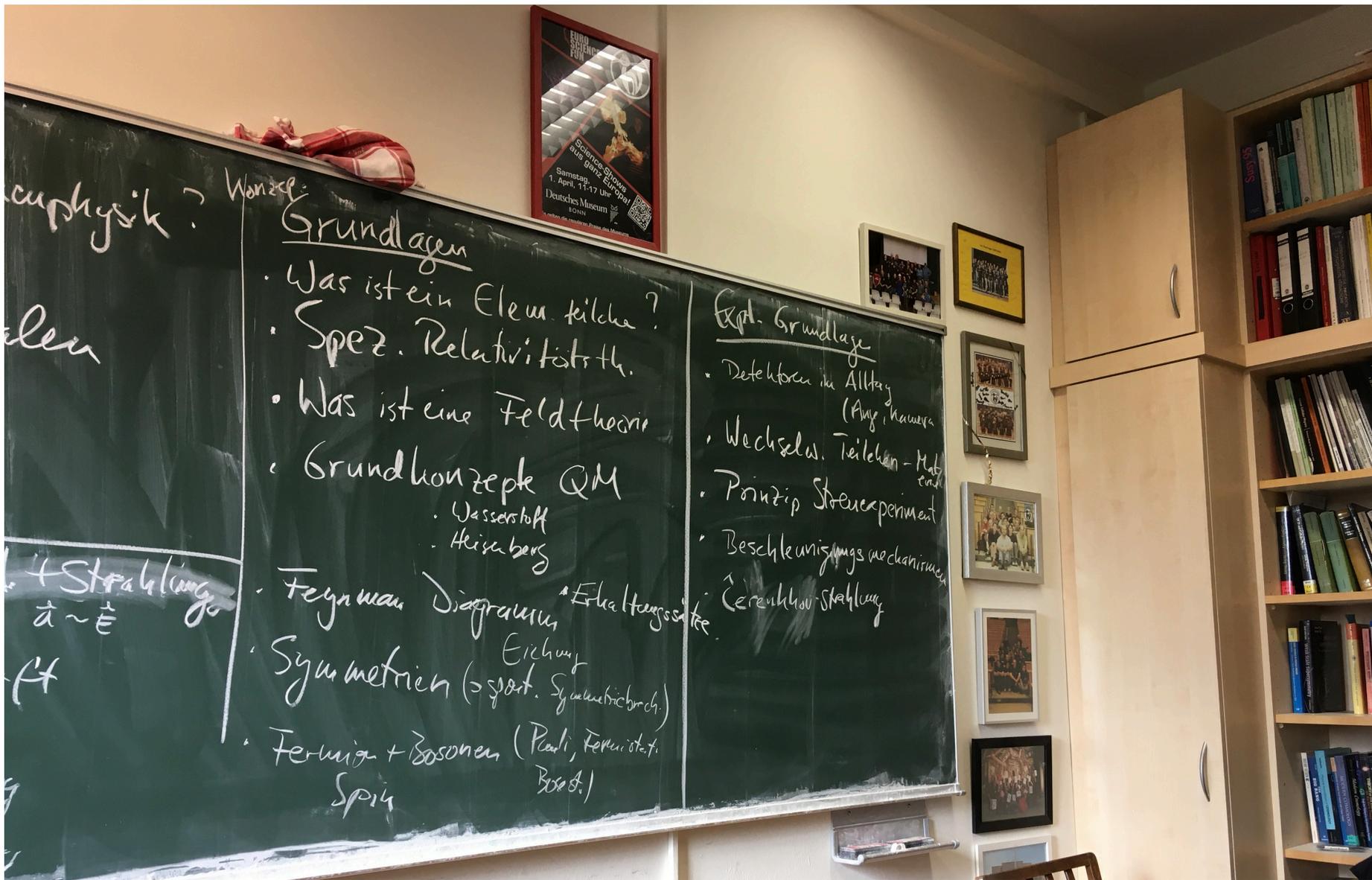


Jörg Pretz



Kristin Riebe

# Der Weg zur Struktur



P. Bechtle: Faszinierende Teilchenphysik

Ein populärwissenschaftliches Buch über Theorien, Experimente und Methoden

# Methoden sind wichtig

160

6 Grundlagen der Auswertung von Teilchenphysikmessungen

Die Erfindung des World Wide Web

161

## Die Erfindung des World Wide Web

Offene weltumspannende Wissenschaft für eine offene Gesellschaft

Teilchenphysikerinnen und -physiker aus aller Welt arbeiten an Projekten, die teilweise Tausende experimentell arbeitende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in einer gemeinsamen Arbeit an Experimenten und Publikationen zusammenführen, oder die den kritischen Austausch hochfliegender Ideen zwischen theoretisch arbeitenden Forschenden aus aller Welt betreffen. Diese Arbeit beruht auf dem offenen Austausch von Ideen in einer offenen Gesellschaft der Wissenschaft, über alle Grenzen hinweg. Dies hat grundlegende Auswirkungen auf unsere gesamte Informationsgesellschaft.

Der Ursprung der massenhaften Verwendung der allgemein als *Internet* bezeichneten Sammlung an elektronischen Informationsdiensten wie z.B. der E-Mail oder anderen auf der bestehenden Internet-Infrastruktur beruhender Dienste liegt im Jahr 1989 bei Tim Berners-Lee am CERN. Um den vier experimentellen Kollaborationen am Large Electron-Positron Collider



Tim Berners-Lee am CERN

LEP (Warum ausgerechnet das Standardmodell? ↓) eine bessere Möglichkeit zur weltweiten Kommunikation zu verschaffen, entwickelte er einen auf Visualisierung von Text (und sehr bald Bildern und Videos) basierten Informationsaustauschdienst, in dem jeder Inhalt mit jedem verknüpft werden konnte: Das World Wide Web (WWW) war geboren. CERN stellte den Dienst unter eine freie Lizenz und machte damit eine technologische Entwicklung genauso offen und frei der Menschheit zugänglich wie auch die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Experimente.

Ein Bild der ersten Webseite der Welt ist in der Abbildung links zu sehen. Das, was das WWW zu einem Netz macht – die geniale Idee der einfachen Verknüpfung von Inhalten – und was unsere Informationsgesellschaft heute formt, funktioniert in diesem Buch in gedruckter Form aber nicht: Mit dem Finger auf Links zu tippen wird Sie nicht zu den verknüpften Inhalten führen.

Die erste Webseite der Welt am CERN aus dem Jahr 1989

**World Wide Web**

The WorldWideWeb (W3) is a wide-area [hypertext](#) information retrieval initiative aiming to give universal access to a large universe of documents.

Everything there is online about W3 is linked directly or indirectly to this document, including an [executive summary](#) of the project, [Mailing lists](#), [Policy](#), [November's W3 news](#), [Frequently Asked Questions](#).

[What's out there?](#)  
Pointers to the world's online information, [subjects](#), [W3 servers](#), etc.

[Help](#)  
on the browser you are using

[Software Products](#)  
A list of W3 project components and their current state. (e.g. [Line Mode](#), [X11 Style](#), [HiXTerm](#), [Servers](#), [Tools](#), [Mail robot](#), [Libraries](#))

[Technical](#)  
Details of protocols, formats, program internals etc.

[Bibliography](#)  
Paper documentation on W3 and references.

[People](#)  
A list of some people involved in the project.

[History](#)  
A summary of the history of the project.

[How can I help?](#)  
If you would like to support the web.

[Getting code](#)  
Getting the code by [anonymous FTP](#), etc.

CERN <https://home.cern/science/computing/birth-web> The birth of the Web (englisch)

Experimentelle Forschung in der Teilchenphysik → S. 24

Wie macht die Physik Fortschritte? → S. 22

Warum ausgerechnet das Standardmodell? → S. 228

Seit 1990, dem Jahr der Veröffentlichung des WWW, ist der Informationsaustausch im Internet geradezu explodiert. Im Jahr 2014 produzierte jeder einzelne Mensch auf der Erde im Schnitt schon so viel digitalen Datentransfer wie im Jahr 1984 auf der ganzen Welt insgesamt ausgetauscht wurde – vor der Erfindung des WWW. Die Vernetzung und die niedrighschwellige Zugänglichkeit des WWW waren dafür entscheidend. Dass dies nicht nur mehr Informationsaustausch, sondern auch gesellschaftliche Veränderungen großer Tragweite hervorrief, ist unter kritischen und befürwortenden Stimmen unumstritten.

Doch damit endet die Geschichte des offenen Datenaustauschs nicht: HEUTE betreiben die LHC-Kollaborationen und das CERN ein weltumspannendes Analysenet für wissenschaftliche Daten, in dem mehr als zehn Gigabit an Daten pro Sekunde nicht nur ausgetauscht, sondern zur Rekonstruktion (↓) und Analyse (↓) auch verarbeitet werden.

Zum offenen Austausch gehört der freie Zugriff auf Daten und Ideen, also auch der freie Austausch von wissenschaftlichen Veröffentlichungen ohne Abhängigkeit von den Wissenschaftsverlagen. Auch dies wird durch das World Wide Web ermöglicht: Heutzutage ist ein *Preprint*-Server eine allgemein anerkannte Plattform zum freien und für alle zugänglichen Austausch von Resultaten unabhängig von *Peer Reviews*, und der Publikation durch einen Wissenschaftsverlag. Das erste und mit heutzutage ca. 16.000 neuen Artikeln pro Monat auch aktivste Preprint-Archiv ist [arxiv.org](http://arxiv.org), das vom Teilchenphysiker Paul Ginsparg 1991 gegründet wurde. Nicht nur beschleunigt dies den Austausch, es ermöglichte auch allen Menschen ohne Universitätszugehörigkeit, die Artikel zu lesen. Denn ohne die



„Researchers prefer that their progress depends on working harder or on having some key insight, rather than on privileged access to essential materials.“ – *arXiv* founder Paul Ginsparg, 2011

„Forscher ziehen es vor, dass ihr Fortschritt von härterer Arbeit oder einer wichtigen Erkenntnis abhängt und nicht von einem privilegierten Zugang zu grundlegenden Materialien.“ – Aussage von *arXiv*-Gründer Paul Ginsparg, 2011

Abonnements, welche die Universitätsbibliotheken mit den Verlagen schließen mussten, um auf die Erkenntnisse ihrer eigenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zuzugreifen, konnte vorher kaum ein wissenschaftlicher Artikel gelesen werden. So wäre auch die jüngere Geschichte der Mathematik ohne das *arXiv* anders verlaufen: Grigori Perelman veröffentlichte 2003 nur dort und nicht in einem Journal seinen revolutionären Beweis der Poincaré-Vermutung, eines der bis dahin ungelösten sieben größten bekannten Rätsel der Mathematik, für den er den weltweit wichtigsten Mathematikpreis verliehen bekam: die Fields-Medaille.

Die internationalen Datenströme der Rechenzentren der Teilchenphysik



Cornell University <https://arxiv.org> *arXiv*

Rekonstruktion: Orts- und Impulsmessung → S. 72, Energiemessung von Teilchen → S. 74

und Signaturen von Teilchen → S. 76

Analyse: Trigger und Datenverarbeitung → S. 140 und Neuronale Netzwerke und maschinelles

Lernen → S. 158



# Methoden sind wichtig

160

6 Grundlagen der Auswertung von Teilchenphysikmessungen

Die Erfindung des World Wide Web

161

## Die Erfindung des World Wide Web

Offene weltumspannende Wissenschaft für eine offene Gesellschaft

Teilchenphysikerinnen und -physiker aus aller Welt arbeiten an Projekten, die teilweise Tausende experimentell arbeitende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in einer gemeinsamen Arbeit an Experimenten und Publikationen zusammenführen, oder die den kritischen Austausch hochfliegender Ideen zwischen theoretisch arbeitenden Forschenden aus aller Welt betreffen. Diese Arbeit beruht auf dem offenen Austausch von Ideen in einer offenen Gesellschaft der Wissenschaft, über alle Grenzen hinweg. Dies hat grundlegende Auswirkungen auf unsere gesamte Informationsgesellschaft.

Der Ursprung der massenhaften Verwendung der allgemein als *Internet* bezeichneten Sammlung an elektronischen Informationsdiensten wie z. B. der E-Mail oder anderen auf der bestehenden Internet-Infrastruktur beruhender Dienste liegt im Jahr 1989 bei Tim Berners-Lee am CERN. Um den vier experimentellen Kollaborationen am Large Electron-Positron Collider



Tim Berners-Lee am CERN

LEP (Warum ausgerechnet das Standardmodell? ↓) eine bessere Möglichkeit zur weltweiten Kommunikation zu verschaffen, entwickelte er einen auf Visualisierung von Text (und sehr bald Bildern und Videos) basierten Informationsaustauschdienst, in dem jeder Inhalt mit jedem verknüpft werden konnte: Das World Wide Web (WWW) war geboren. CERN stellte den Dienst unter eine freie Lizenz und machte damit eine technologische Entwicklung genauso offen und frei der Menschheit zugänglich wie auch die wissenschaftlichen Erkenntnisse der Experimente.

Ein Bild der ersten Webseite der Welt ist in der Abbildung links zu sehen. Das, was das WWW zu einem Netz macht – die geniale Idee der einfachen Verknüpfung von Inhalten – und was unsere Informationsgesellschaft heute formt, funktioniert in diesem Buch in gedruckter Form aber nicht: Mit dem Finger auf Links zu tippen wird Sie nicht zu den verknüpften Inhalten führen.

Die erste Webseite der Welt am CERN aus dem Jahr 1989

**World Wide Web**

The World Wide Web (W3) is a wide-area, [hypertext](#) information retrieval initiative aiming to give universal access to a large universe of documents.

Everything there is online about W3 is linked directly or indirectly to this document, including an [executive summary](#) of the project, [Mailing lists](#), [Public](#), [November's W3 news](#), [Frequently Asked Questions](#).

**What's out there?**

Pointers to the world's online information, [subjects](#), [W3 servers](#), etc.

**Help**

on the browser you are using

**Software/Tools**

A list of W3 project components and their current state. (e.g. [Line Mode](#), [X11 Style](#), [NoXTerm](#), [Servers](#), [Tools](#), [Mail robot](#), [Libraries](#))

**Technical**

Details of protocols, formats, program internals etc.

**Bibliography**

Paper documentation on W3 and references.

**People**

A list of some people involved in the project.

**History**

A summary of the history of the project.

**How can I help?**

If you would like to support the web.

**Getting code**

Getting the code by [anonymous FTP](#), etc.

CERN <https://home.cern/science/computing/birth-web> The birth of the Web (english)

Experimentelle Forschung in der Teilchenphysik → S. 24

Wie macht die Physik Fortschritte? → S. 22

Warum ausgerechnet das Standardmodell? → S. 228

Seit 1990, dem Jahr der Veröffentlichung des WWW, ist der Informationsaustausch im Internet geradezu explodiert. Im Jahr 2014 produzierte jeder einzelne Mensch auf der Erde im Schnitt schon so viel digitalen Datentransfer wie im Jahr 1984 auf der ganzen Welt insgesamt ausgetauscht wurde – vor der Erfindung des WWW. Die Vernetzung und die niedrigschwellige Zugänglichkeit des WWW waren dafür entscheidend. Dass dies nicht nur mehr Informationsaustausch, sondern auch gesellschaftliche Veränderungen großer Tragweite hervorrief, ist unter kritischen und befürwortenden Stimmen unumstritten.

Doch damit endet die Geschichte des offenen Datenaustauschs nicht: Heute betreiben die LHC-Kollaborationen und das CERN ein weltumspannendes Analysenetz für wissenschaftliche Daten, in dem mehr als zehn Gigabit an Daten pro Sekunde nicht nur ausgetauscht, sondern zur Rekonstruktion (↓) und Analyse (↓) auch verarbeitet werden.

Zum offenen Austausch gehört der freie Zugriff auf Daten und Ideen, also auch der freie Austausch von wissenschaftlichen Veröffentlichungen ohne Abhängigkeit von den Wissenschaftsverlagen. Auch dies wird durch das World Wide Web ermöglicht: Heutzutage ist ein Preprint-Server eine allgemein anerkannte Plattform zum freien und für alle zugänglichen Austausch von Resultaten unabhängig von Peer Reviews, und der Publikation durch einen Wissenschaftsverlag. Das erste und mit heutzutage ca. 16.000 neuen Artikeln pro Monat auch aktivste Preprint-Archiv ist [arxiv.org](http://arxiv.org), das von Teilchenphysiker Paul Ginsparg 1991 gegründet wurde. Nicht nur beschleunigt dies den Austausch, es ermöglichte auch allen Menschen ohne Universitätszugehörigkeit, die Artikel zu lesen. Denn ohne die



„Researchers prefer that their progress depends on working harder or on having some key insight, rather than on privileged access to essential materials.“ – arXiv founder Paul Ginsparg, 2011

„Forscher ziehen es vor, dass ihr Fortschritt von härterer Arbeit oder einer wichtigen Erkenntnis abhängt und nicht von einem privilegierten Zugang zu grundlegenden Materialien.“ – Aussage von arXiv-Gründer Paul Ginsparg, 2011

Abonnements, welche die Universitätsbibliotheken mit den Verlagen schließen mussten, um auf die Erkenntnisse ihrer eigenen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zuzugreifen, konnte vorher kaum ein wissenschaftlicher Artikel gelesen werden. So wäre auch die jüngere Geschichte der Mathematik ohne das arXiv anders verlaufen: Grigori Perelman veröffentlichte 2003 nur dort und nicht in einem Journal seinen revolutionären Beweis der Poincaré-Vermutung, eines der bis dahin ungelösten sieben größten bekannten Rätsel der Mathematik, für den er den weltweit wichtigsten Mathematikpreis verliehen bekam: die Fields-Medaille.

Die internationalen Datenströme der Rechenzentren der Teilchenphysik



Cornell University <https://arxiv.org> arXiv

Rekonstruktion: Orts- und Impulsmessung → S. 72, Energiemessung von Teilchen → S. 74

und Signaturen von Teilchen → S. 76

Analyse: Trigger und Datenverarbeitung → S. 140 und Neuronale Netzwerke und maschinelles Lernen → S. 158

